

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
LABORATOIRE I.S.T.O. (*Institut des Sciences de la Terre d'Orléans*)

THÈSE présentée par : **Thomas MARTAUD** soutenue le : **22 octobre 2008**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**
Discipline/ Spécialité : Sciences de l'Univers

Évaluation environnementale de la production de granulats naturels en exploitation de carrière – Indicateurs, Modèles et Outils –

THÈSE dirigée par :

Mme Agnès JULLIEN
Mme Chantal PROUST

Directrice de recherche, LCPC
Maître de conférence HDR, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

M. Félix DARVE
Mme Catherine LAVANDIER

Professeur, INPG
Maître de conférence HDR, IUT de Cergy-Pontoise

JURY :

M. Pierre DELAGE
Mme Agnès JULLIEN
Mme Chantal PROUST
M. Félix DARVE
Mme Catherine LAVANDIER
M. Ary BRUAND
M. Thierry JOURDAIN
M. Christian LUCION

Directeur de recherche, ENPC
Directrice de recherche, LCPC
Maître de conférence HDR, Université d'Orléans
Professeur, INPG
Maître de conférence HDR, IUT de Cergy-Pontoise
Professeur, Université d'Orléans
Directeur Environnement et Foncier, CEMEX Granulats Centre
Chef de Travaux, Université de Louvain - Belgique

Président du jury

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

PREAMBULE.....	9
INTRODUCTION GENERALE	11
Contexte de la thèse.....	11
Positionnement de la thèse.....	11
Démarche adoptée dans le cadre de la thèse.....	13
CHAPITRE I - ÉTAT DE L'ART EN MATIERE DE RESSOURCES EN GRANULATS ET DE METHODES D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE	15
I- Introduction	17
II- Ressources en granulats naturels	17
II.1- Les usages des granulats naturels.....	17
II.2- Les différents natures de granulats naturels	18
II.3- L'élaboration des granulats naturels en carrière	19
II.3.1- L'extraction	19
II.3.2- Le chargement et le transport.....	22
II.3.3- Le traitement	23
II.4- Le suivi de la production et de la gestion du site	26
II.5- La réglementation relative aux exploitations de carrière	27
II.5.1- L'historique	27
II.5.2- La réglementation en vigueur et conditions d'exploitation à l'échelle temporelle.....	28
II.5.3- Les conditions d'exploitation à l'échelle du territoire : Schémas Départementaux de Carrières	29
II.5.4- L'étude d'impact	31
II.6- Les étapes de la vie d'une carrière	31
II.6.1- Du projet à l'ouverture du site.....	32
II.6.2- La phase d'exploitation	32
II.6.3- La fin de l'exploitation et la remise en état.....	32
II.6.4- L'après carrière	33
III- Méthodes d'évaluation environnementale - Indicateurs	35
III.1- Les méthodes et outils de l'évaluation environnementale	35
III.1.1- L'Évaluation des Performances Environnementales (EPE)	36
III.1.2- L'Analyse de Cycle de Vie (ACV)	38
III.2- Les indicateurs de développement durable	45
IV- Discussion	49
IV.1 – Intérêts et limites des méthodes d'évaluation environnementale.....	49
IV.1.1- Méthode EPE	49
IV.1.2- Méthodologie ACV	50
IV.1.3- Synthèse en vue d'applications à des sites industriels.....	50
IV.2- Mise en place, portée et limites d'indicateurs	51
IV.2.1- Mise en place	51

IV.2.2- La portée et les limites des indicateurs	52
V- Conclusion.....	54
 CHAPITRE II - ÉTUDES DE SITES DE PRODUCTION EN CARRIERE SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS	55
I- Introduction	57
II- Démarche d'études des sites.....	57
II.1- Recherche d'une échelle géographique d'étude pertinente	58
II.2- Recherche de critères d'études de sites de carrière pertinents	63
III- Présentation des sites étudiés	64
III.1 -Site d'étude n°1 : carrière de roches massives.....	64
III.1.1- Implantation et autorisation d'exploiter.....	64
III.1.2- Nature et utilisation des matériaux	65
III.1.3- Organisation de la production	66
III.1.4- Collectes de données relatives au site n°1	70
III.2 -site d'étude n°2 : carrière de roches alluvionnaires	75
III.2.1- Implantation et autorisation d'exploiter.....	75
III.2.2- Nature et utilisation des matériaux	75
III.2.3- Organisation de la production	76
III.2.4- Collectes de données relatives au site n°2	81
III.3- Site d'étude n°3 : carrière de roches alluvionnaires.....	86
III.3.1- Implantation et autorisation d'exploiter.....	86
III.3.2- Nature et utilisation des matériaux	86
III.3.3- Organisation de la production	87
III.3.4- Collectes des données relatives au site n°3.....	89
IV- Discussion	95
V- Conclusion.....	98
 CHAPITRE III - MODELISATION ENVIRONNEMENTALE DE LA PRODUCTION DE GRANULATS NATURELS : DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL CADUR (CARRIERE DURABLE).....	99
I- Introduction	101
II- Démarche de modélisation	101
II.1- Modèle global des sites de carrières.....	101
II.2- Cahier des charges de l'outil d'évaluation environnementale CADUR	102
II.3- Collecte de données nécessaires aux différents modèles de l'outil CADUR.....	104
III- Modélisation par domaine	104
III.1- Consommations énergétiques	105
III.1.1- Modélisation des consommations d'énergie électrique	105
III.1.2- Modélisation des consommations d'énergie fossile	108
III.2- Émissions atmosphériques	109
III.2.1- Émissions générées lors des tirs d'abattage	109

III.2.2- Émissions générées par la combustion de carburant.....	110
III.3- Approches théoriques des émissions sonores	113
III.3.1- Propagation du bruit.....	113
III.3.2- Le modèle CADUR.....	119
IV- L’outil CADUR.....	125
IV.1- Principes fonctionnels de l’outil	126
IV.2- Fonctionnalités de l’outil d’évaluation CADUR	127
IV.2.1- Le modèle Énergie,.....	127
IV.2.2- Le modèle Rejets atmosphériques,	128
IV.2.3- Le modèle Bruit,	129
V- Conclusion.....	129
 CHAPITRE IV - MODELISATION ENVIRONNEMENTALE DES CONSUMMATIONS, REJETS ATMOSPHERIQUES ET EMISSIONS SONORES DE LA PRODUCTION DE GRANULATS EN CARRIERE.....	
	131
Introduction	133
I- Modélisation des sites avec l’outil CADUR.....	133
I.1 – Etapes de paramétrage du modèle pour un site.....	133
I.2 – Modélisation de la configuration de l’usine du site n°1	134
I.2.1- Définition des lignes de production pour le site n°1	134
I.2.2- Description de la configuration de production pour le site n°1	135
I.3- Modélisation de la configuration de l’usine du site n°2	135
I.3.1- Définition des lignes de production pour le site n°2	135
I.3.2- Test des différentes configurations de production pour le site n°2	136
I.4- Modélisation de la configuration de l’usine du site n° 3	137
I.4.1- Définition des lignes de production pour le site n°3	137
I.4.2- Test des différentes configurations de production pour le site n°3	138
I.5- Bilan sur la saisie des lignes de production et de leur configuration	138
II- Simulations avec le modèle Energie	139
II.1- Résultats des consommations énergétiques pour le site n°3	139
II.2- Résultats des consommations énergétiques pour le site n°1	141
II.3- Résultats des consommations énergétiques pour le site n°2	142
II.4- Synthèse des simulations de consommation d’énergie pour les trois sites	145
III- Simulations avec le modèle rejets atmosphériques	145
III.1- Simulations des émissions atmosphériques sur le site n°1	145
III.1.1- Calculs des rejets dus à l’utilisation des engins	145
III.1.2- Calculs des rejets dus à l’utilisation des explosifs	146
III.2 – Simulation des émissions atmosphériques sur le site n°2	147
III.3- Simulations des émissions atmosphériques sur le site n°3	148
III.4- Analyse des émissions de gaz à effet de serre par engin pour les sites	149
IV- Simulations avec le modèle Bruit	152
IV.1 – Prédictions des émissions sonores sur le site n°3	152
IV.2 – Prédictions des émissions sonores sur le site n°1	152
IV.3 – Prédictions des émissions sonores sur le site n°2	154

V- Discussion.....	155
V.1- Synthèse des caractéristiques énergétiques des sites étudiés	155
V.1.1- Comparaison des CESP avec les données de la littérature	155
V.1.2- Comparaison des valeurs de CESP entre les sites.....	156
V.2- Synthèse des prédictions des rejets atmosphériques des sites étudiés	157
V.3- Synthèse des prédictions de bruit des sites étudiés	158
VI- Conclusion	158
CONCLUSION GENERALE.....	161
Contexte du travail de thèse	161
Rappel de la démarche.....	161
Principaux résultats obtenus	162
Perspectives d'amélioration du modèle.....	163
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	165
ANNEXES	173
-Annexe 1- Questionnaire « Siège »	175
-Annexe 2- Questionnaire « Site ».....	179
- Annexe 3 - modélisation des lignes de production	191
-Annexe 4 - Configurations d'affectation testées pour les différents sites	197
- Annexe 5 - Valeurs d'intensité des moteurs électriques présents sur le site n°2.....	199
- Annexe 6 - Autres types de rejets atmosphériques	201
GLOSSAIRE	207
LISTE DES FIGURES	209
LISTE DES TABLEAUX	211
RESUME	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

PREAMBULE

Depuis toujours, l'Homme utilise des matériaux naturels pour la construction de son habitat et l'aménagement de son environnement. Après s'être abrités dans des cavernes et avoir construit en branchages, en peaux animales et en terre, les bâtisseurs utilisèrent des pierres dures pour édifier des bâtiments plus importants, alors que les villes et les sociétés se structuraient et se développaient. Pyramides, temples, châteaux et maisons témoignent du « génie constructeur » de nos ancêtres.

C'est au XVe siècle qu'un début de réglementation sur les mines se met en place. L'édit de Charles VI (règne de 1380 à 1422), du 30 mai 1413 affirme les droits du souverain sur les métaux non ferreux et met en fonction des juges des mines. « ...*Il soit ainsi que plusieurs, tant d'église comme séculiers, qui ont juridictions hautes, moyennes et basses, et territoires sur les quels lesdites mines sont assises, veulent s'efforcer d'avoir en icelles mines la dixiesme partie purifiée et autres droicts comme nous... laquelle chose est contre raison, les droicts et prééminences Royaux de la Couronne de France et la chose publique* »

Durant ce siècle, la législation minière varie selon les provinces et les époques. En règle générale, le seigneur autorise l'extraction et perçoit un pourcentage sur les bénéfices d'exploitation. En fait, les rois ont eu longtemps à combattre les prétentions des seigneurs sous l'anarchie féodale ; chaque possesseur de fief s'attribuait une sorte de souveraineté sur tout ce qui relevait de ses domaines et y disposait, à sa volonté, des biens et des personnes.

A dater de Philippe-le-Bel (1285-1314), les rois, à l'aide des communes, effacent et absorbent peu à peu toutes les souverainetés locales, et la féodalité disparaît sous Louis XI (1461-1483). Certes, ce dernier, dans une ordonnance, accorde aux seigneurs une part dans les produits des mines ouvertes sur leurs terres, « *une portion soit d'un dixième, soit d'un demi-dixième, ou autre somme plus grande ou plus petite, selon la qualité et valeur des dites mines* ». Cependant, cet édit reste une preuve que le droit régalien existait car il institue un « grand-maître super-intendant », ayant le pouvoir de faire ouvrir les mines, à qui il confère le droit de statuer sur tous les différents en ce domaine et donc d'autoriser les propriétaires fonciers d'exploiter.

Charles IX (1560-1574) confirma ces ordonnances. Des seigneurs ayant voulu s'y opposer, le roi rappelle par les édits du 1^{er} juin 1562 et 26 mai 1563 les droits de sa couronne, qui ne peuvent être usurpés par personne : « *La déclaration du roy porte que le droit de dixième appartient au roy par droit de souveraineté sur toutes les mines et minières qui ont été par cy-devant et seront cy-après ouvertes* ». Henri IV (1589-1610) renforça, dans les 2 édits de juin 1601 et de mai 1604, le fait que l'autorisation d'exploiter les mines ne peut émaner que du roi.

La déclaration du roi Louis XVI du 17 mars 1780 est sans doute le texte le plus ancien concernant les carrières. Elle marque le début d'une codification des dispositions, fort peu contraignante à l'époque, régissant les lieux appelés « carrières ». Mais c'est la loi du 28 juillet 1791 qui a supprimé l'ensemble des privilèges des seigneurs et qui a décrété que le sous-sol est propriété de l'État. Cette loi, votée sous le régime de Napoléon, allait permettre le développement des grandes sociétés sur des concessions étendues.

INTRODUCTION GENERALE

Contexte de la thèse

L'activité de construction est immanquablement liée à la notion de développement d'un pays. Ce concept s'appuie sur un certain nombre d'activités anthropiques dont une partie dépend des diverses infrastructures construites. L'existence d'établissements d'enseignement est significative d'une société qui entretient et fait progresser son savoir ; l'existence d'hôpitaux ou d'autres infrastructures de soins montre une société préoccupée par la santé publique ; l'existence de routes ou de voies ferrées est indispensable aux échanges commerciaux de biens matériels, base de l'enrichissement des sociétés. Par ailleurs, les attentes en matière de respect de l'environnement et du cadre de vie sont aujourd'hui exprimées de plus en plus nettement par tous les secteurs économiques et sociaux. Cette prise de conscience se traduit plus particulièrement par un souci constant de réduction des impacts des activités agricoles, artisanales, industrielles ou de service. En effet, toutes les activités de l'homme interagissent avec son environnement et entraînent des impacts positifs et négatifs.

L'évolution historique des techniques de construction a vu l'utilisation de divers matériaux parmi lesquels on pourra citer le torchis, le bois, la pierre de taille, l'acier et le verre pour les bâtiments, la terre battue, les dalles ou les pavés pour les infrastructures de transport. Chacun de ces matériaux trouve toujours son utilité pour des besoins spécifiques. Mais les méthodes de construction qui répondent aujourd'hui le mieux aux attentes de nos sociétés sont celles qui passent par la mise en œuvre de granulats, qui répondent à la définition de « matériaux granulaires utilisés dans la construction » (AFNOR, 2004^a). Ces matériaux sont issus d'une ressource pratiquement universelle, leur élaboration est relativement simple, leur transport facile, leur mise en œuvre rapide. Aujourd'hui, les mélanges granulaires, bétons, mortiers, graves traitées ou non traitées, enrobés, représentent la solution la plus logique et la plus économique pour la construction des infrastructures. Les granulats sont les composants de base de ces mélanges, dont ils constituent 90 à 100 % de la masse : la construction d'un lycée nécessite près de 3000 t de granulats, celle d'un hôpital près de 5000 t, celle d'un kilomètre de route 12000 t et celle d'un kilomètre d'autoroute environ 30 000 t (Arquié *et al.*, 1990^b). De ce fait, la France consomme annuellement une quantité de granulats estimée à environ 420 millions de tonnes, soit une moyenne de 7 tonnes par habitant et par an ou bien encore 20 kg quotidiennement (UNPG, 2006).

Ainsi, à l'heure où la préservation de l'environnement est devenue une exigence sociétale, l'exploitation des granulats naturels en carrières permet de s'assurer de la pérennité des approvisionnements, avec une volonté affichée de concilier les impératifs économiques et environnementaux dans une perspective de développement durable. D'un point de vue réglementaire, en réponse à cette activité industrielle indispensable, les Schémas Départementaux de Carrières (SDC) constituent un instrument d'aide à la décision pour les préfets ; l'environnement y est cependant abordé d'un point de vue uniquement qualitatif.

Positionnement de la thèse

Dans le domaine du génie civil et plus particulièrement des sols, le travail de modélisation relatif à des modèles physiques ou mécaniques s'intègre depuis de nombreuses années à des réflexions menées dans le cadre de réseaux de chercheurs qui se sont fédérés au cours du temps pour construire un référentiel partagé (ALERT Geomaterials).

Dans le domaine de l'environnement, la mise en place de méthodes d'évaluation environnementale appliquées au génie civil est très récente (après l'an 2000), et a plutôt débuté du côté des ouvrages, en se traduisant d'abord par la mise en place d'une norme pour les bâtiments (NF P01-010, 2004) pour aborder le cycle de vie des matériaux et les flux engendrés (consommations, rejets). Parallèlement, la pression de la société pour améliorer son confort de vie traduit notamment une demande de réduction des nuisances sonores. Les installations industrielles sont ainsi concernées par une réglementation pointue sur les niveaux de bruit émis. Les travaux de recherche dans le domaine de l'acoustique sont très nombreux, et mettent en évidence le fait que l'être humain perçoit son environnement sonore essentiellement en le caractérisant par les sources qui le composent (Lavandier, 2007).

Un programme de recherche mené au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées vise, depuis plusieurs années, à proposer l'évaluation globale environnementale des infrastructures routières proches des méthodes d'« Analyse du cycle de Vie ». Ces approches nécessitent l'étude de chacune des étapes de la vie des matériaux et des ouvrages donc des granulats. Le cycle de vie de ces derniers commence à la carrière où ils vont être élaborés par le producteur à partir de gisements, passe par une usine de fabrication de mélange, avec ajout de liants selon les besoins, pour finalement servir à l'élaboration de routes ou de tout autre ouvrage de génie civil. La division DDGC (Démarches durables en Génie Civil) du LCPC développe des outils d'évaluation environnementale, économique et sociale des infrastructures routières dans une perspective de « développement durable ». Elle s'intéresse notamment à la ressource disponible en granulats, aux différentes qualités d'emploi de ces matériaux, à l'élaboration de mélanges utilisant les granulats en combinaison avec un liant hydraulique ou bitumineux, puis à la mise en œuvre de ce mélange sur chantier.

Une première étape de ce programme de recherche a été réalisée dans le cadre d'une précédente thèse, en proposant une méthode d'évaluation intitulée « Module Routier Élémentaire » (Hoang, 2005). Un premier outil réalisé sur cette base et sous excel a permis une évaluation environnementale de tronçons routiers interurbains depuis sa construction, en passant par son entretien sur une durée de service définie. Seuls les flux de consommations d'énergie et de rejets vers l'environnement ont alors été calculés. Ce travail de thèse a également mis en évidence le manque crucial de données environnementales relatives à la production de granulats naturels. Un second travail de thèse (Sayagh, 2007) a permis de compléter et d'affiner ce premier outil en intégrant notamment l'évaluation des chaussées urbaines et l'évaluation des impacts. Afin de palier au manque de données concernant les granulats naturels, cet outil utilise les résultats de flux environnementaux obtenus lors du présent travail de thèse (Martaud *et al.*, 2008). Le développement d'outils d'évaluation passe d'abord par la réalisation de bilans environnementaux des matériaux et des techniques du génie civil pour, in fine, proposer et classer différentes solutions techniques selon la nature et la provenance de la ressource en granulats. Dans ce cadre, un partenariat a été établi entre la division DDGC et l'ISTO (Institut des Sciences de la Terre d'Orléans) de l'Université d'Orléans, spécialiste dans le domaine de l'environnement et des sols.

Les décideurs, ayant besoin d'informations claires et concises sur l'état de l'environnement naturel ainsi que sur les effets des politiques mises en œuvre, doivent pouvoir s'appuyer sur des éléments de mesures fiables et pertinents, ce qui a conduit au développement d'Indicateurs de Développement Durable (IDD).

Plus ailleurs, cette nécessité de disposer d'indicateurs pour guider le processus de développement durable a été reconnue dès la conférence de Rio de 1992, dont est issu le programme d'action Agenda 21 au sein duquel est revendiqué la construction d'IDD pour évaluer la durabilité (Boulanger, 2004) : chapitre 40 de l'agenda 21, « Les indicateurs courants tels que le produit national brut (PNB) et la mesure des divers courants de ressources ou de pollution ne permettent pas d'évaluer la durabilité des systèmes. Les méthodes d'évaluation des interactions entre les divers paramètres de l'environnement, de la démographie, de la société et du développement ne sont pas suffisamment développées et appliquées. Il faut donc élaborer des indicateurs de développement durable afin qu'ils constituent une base utile pour la prise de décisions à tous les niveaux et contribuent à la durabilité autorégulatrice des systèmes intégrés de l'environnement et du développement ».

Ainsi appliqués au champ du développement durable, les indicateurs visent à lier les dimensions environnementales mais aussi économiques et sociales de l'écosystème. En effet, ils contribuent à développer l'information environnementale, plus seulement d'un point de vue technique, scientifique et thématique comme cela était le cas (inventaire ZNIEFF, base de données de la qualité de l'air, ...), mais également en se référant à l'environnement de l'environnement, c'est-à-dire à l'économie et au social (Bouni, 1998). Ils consistent à évaluer non seulement le développement, mais également sa durabilité, en révélant les conditions écologiques, en prenant en considération les objectifs sociaux et en reflétant les moyens économiques mis à disposition (Risse et Waaub, 1999). La mise au point d'un ensemble d'indicateurs pertinents d'un point de vue scientifique et politique, et harmonisés à l'échelle internationale, apparaît donc être un enjeu important voire indispensable pour appréhender le mieux possible notre cheminement sur la voie du développement durable. Au-delà de la nécessité pour les décideurs (publics et privés) de s'appuyer sur des données pour évaluer l'évolution vers un développement durable et pour définir des orientations à privilégier, les indicateurs constituent une opportunité d'acquisition de nouvelles connaissances, informations et idées, l'occasion de créer un cadre de réflexions, d'échanges. Ils constituent par là même un élément clé de la réflexion sur ce que pourrait être une politique publique de développement durable.

Le présent travail, dont l'objectif principal est la réalisation d'un bilan environnemental de la production de granulats en carrière, s'inscrit dans le cadre de ce programme en s'intéressant plus particulièrement à la naissance proprement dite des granulats, depuis leur extraction jusqu'à leur élaboration en carrière. Ainsi, ce travail s'attachera, d'une part, à intégrer sous forme d'indicateurs de développement durable un maximum d'effets environnementaux, en prenant en compte les approches économiques et sociales associés à la production des granulats. D'autre part, en se fondant sur ces indicateurs, l'approche vise à développer un outil d'évaluation des pressions générées pour un site de production considéré. Un tel outil débouche sur une utilisation potentielle par les maîtres d'ouvrages ou maîtres d'œuvre pour la sélection d'exploitation lors de la réalisation d'ouvrages de génie civil, et par les exploitants désireux d'inscrire leur activité selon une démarche de développement durable.

Démarche adoptée dans le cadre de la thèse

Une étude bibliographique a d'abord été réalisée ; celle-ci aborde plusieurs thématiques :

- granulats et carrières à l'échelle du territoire national
- réalisation d'une veille réglementaire relative aux exploitations de carrières
- présentation des schémas départementaux de carrières
- analyse des méthodes d'évaluation environnementale

- expressions d'indicateurs de développement durable.

Le chapitre I rassemble les éléments bibliographiques recueillis relatifs à la ressource en granulats naturels en France, aux différents procédés mis en œuvre au cours de leur élaboration et enfin à la notion d'indicateurs classiquement employée dans les différentes méthodes d'évaluation environnementale existantes.

Ce travail permet d'apprécier l'importance de la ressource en granulats naturels et de disposer des éléments de réflexion nécessaires au développement d'un outil d'évaluation environnementale de la production de granulats en exploitation de carrière.

L'expertise de la bibliographie montre qu'il existe peu ou pas d'étude relatant de l'impact environnemental, social et économique de l'exploitation des granulats en carrière au niveau national ou international (Strippel, 2001). De fait, peu de données sont disponibles et les travaux mentionnés ne précisent pas le détail des installations étudiées. Afin de palier ce manque, différents contacts ont été établis en France dès le début de la thèse. Ainsi, les échanges avec les DRIRE (Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement) ont permis un recensement des exploitations sur l'ensemble du territoire national (hors DOM-TOM) et l'acquisition de données générales à ces installations. En parallèle, des échanges ont été engagés avec des professionnels de la ressource en granulats : UNICEM (Union Nationale des Industries des Carrières Et Matériaux de construction), Holcim, Conseil Général des Côtes d'Armor, Cemex granulats.

Ces différents contacts ont permis un travail détaillé à la fois sur des documents d'exploitation de carrière et directement sur site en partenariat avec la profession. Le deuxième chapitre est consacré à un exposé de la démarche adoptée afin de sélectionner des sites à une échelle géographique pertinente, suivi d'une présentation des exploitations de carrière étudiées ainsi que de l'ensemble des données collectées les concernant.

Les deux premiers chapitres de la thèse ont permis de mieux définir la démarche à mettre en œuvre. Nous avons en particulier décidé de nous intéresser à l'évaluation des sites de productions de granulats naturels en différenciant deux types de carrières, selon la cohésion de la roche exploitée : roches massives et roches meubles. Dans le troisième chapitre, nous présentons les différents éléments constitutifs du cahier des charges de l'outil d'évaluation développé, les modèles implémentés ainsi que les fonctionnalités proposées à l'utilisateur. Cet outil permet de simuler séparément, par tonne de matériaux élaborés, pour chaque site considéré :

- les demandes énergétiques en électricité et en combustible fossile, nécessaires à l'élaboration de chacune des classes granulaires produites,
- les émissions vers le compartiment atmosphère générées par l'utilisation des engins de carrière et le cas échéant d'explosifs,
- les courbes d'"iso bruits" générés les engins de carrière.

Le quatrième et dernier chapitre a pour objet de valider les modèles développés, à l'aide des données présentées au chapitre II. Il s'intéresse également au niveau et à la distribution des différents paramètres environnementaux pris en compte pour les sites étudiés. L'incidence de la nature de la roche exploitée ainsi que la plage de production y sont notamment discutée.

CHAPITRE I -

État de l’art en matière de ressources en granulats et de méthodes d’évaluation environnementale

I- Introduction

Ce premier chapitre rappelle tout d'abord l'importance aujourd'hui des granulats et ce qu'ils représentent dans le secteur des industries extractives ; leurs modes d'élaboration industriel et la réglementation appliquée aux exploitations de carrières. Les éléments nécessaires à la compréhension de ce qu'est une exploitation en termes d'organisation, d'équipements, d'engins et de procédés d'extraction sont précisés dans un deuxième temps. Viennent ensuite des explications relatives à la réglementation et aux modalités d'exploitation des sites dont on ne peut pas s'affranchir dans ce travail et qu'il est important d'intégrer à la réflexion. Dans un second volet, une synthèse des principales méthodes et méthodologies d'évaluation environnementale existantes dans la littérature (normes et articles) est proposée. Du fait que l'évaluation environnementale de la production de granulats en carrière nécessite la quantification de paramètres relatifs aux consommations et émissions engendrées vers l'environnement. La fin du chapitre est consacrée à un rappel de la notion d'indicateurs en se projetant dans une perspective de choix d'indicateurs. Cette partie traite de l'origine des indicateurs jusqu'à leur mise en place dans un contexte donné. Les apports et limites des différentes méthodes et indicateurs sont enfin discutés dans l'optique du développement d'un outil d'évaluation environnementale dédié de la production de granulats.

II- Ressources en granulats naturels

Ce paragraphe vise à présenter de façon générale, d'une part des données générales concernant cette ressource naturelle, d'autre part les procédés d'élaborations de ces matériaux en considérant les différents types de roches exploitables et enfin, la réglementation relatives aux exploitations de carrière.

II.1- Les usages des granulats naturels

Au delà de la simple définition, qui évoquerait plutôt un matériau relativement rudimentaire, les granulats s'avèrent en fait être des matériaux soigneusement élaborés dont les caractéristiques sont codifiées dans la plupart des pays, et qui sont en réalité des produits industriels comme les autres. En effet, aux différents types d'usage des granulats correspondent des exigences spécifiques en termes de caractéristiques de ces matériaux (AFNOR, 2004^a). Si la réalisation de remblais peut être faite avec à peu près tous les types de matériaux sols ou roches, à condition d'une mise en œuvre adaptée, il n'en va pas de même pour les autres usages. Les granulats doivent alors répondre à un niveau d'exigence minimum s'ils sont destinés aux sous couches routières ou aux bétons, croissant pour des matériaux de structure ordinaires, voire très strictes lorsqu'ils doivent être inclus dans des ouvrages tels que des ponts, des ballasts de voies ferrées ou des couches de roulement autoroutières.

Un pays comme la France consomme annuellement une quantité de granulats estimée à environ 400 millions de tonnes, soit une moyenne de 7 tonnes par habitant et par an, ce qui place notre pays au 2^{ème} rang européen après l'Allemagne (UEPG, 2005). Ainsi, on considère que la construction d'un kilomètre d'autoroute nécessite approximativement 30 000 tonnes de granulats, un kilomètre de réseau ferroviaire à grande vitesse près de 9000 tonnes et une école environ 3000 tonnes (Arquié *et al.*, 1990^b). A titre d'exemple, 150 000 tonnes de granulats ont été nécessaires à la construction du viaduc de Millau, le plus haut pont du monde (UNPG, 2006). Les granulats alimentant principalement le secteur du BTP, leur production suit, par voie de conséquence, l'évolution générale des commandes de ce secteur. Ainsi, les quantités produites annuellement varient entre 300 et 400 millions de tonnes (Fig.1).

Au vu de ces quantités très importantes, il apparaît très clairement que les granulats sont devenus, aujourd'hui, des matériaux de première nécessité dont l'approvisionnement doit être assuré de façon durable pour les générations futures.

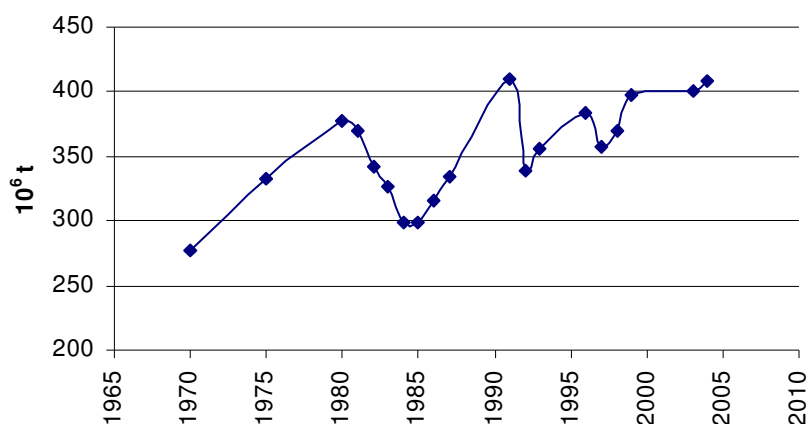


Fig. 1 : Évolution de la production de granulat en France

II.2- Les différents natures de granulats naturels

Les roches susceptibles d'être transformées en granulats naturels sont, par définition, des cas géologiques particuliers. Or, d'une région à l'autre, leur nature ou leurs conditions de gisement peuvent être radicalement différentes. On distingue traditionnellement trois grandes catégories de granulats en fonction de leur origine géologique.

La première est celle des granulats alluvionnaires qui tapissent normalement le fond des vallées. Cette ressource présente un caractère meuble, et donc facile à extraire, en fait logiquement la ressource la plus couramment exploitée. A ce stade, il est utile de souligner que dans certaines régions de pays industrialisés, comme le grand bassin parisien en France, ces matériaux ont été exploités de longue date et les réserves tendent aujourd'hui à s'épuiser. La seconde famille est celle des roches massives siliceuses ou silicatées, regroupées en France sous le vocable restrictif d'« éruptives ». L'origine de ces roches peut être liée au refroidissement de magmas issus des couches internes du globe (granites, diorites, basaltes, ...), ou de la transformation dans les profondeurs de la croûte terrestre de roches d'origines plus superficielles (gneiss, quartzites, ...). Dans la plupart des cas, il s'agit de roches dures profondément enracinées sous le sol et d'aspect massif. Ce type de roche n'affleure que dans des zones géologiques bien définies, qui sont soit les « massifs cristallins », traces d'anciennes montagnes arasées au cours des ères géologiques, soit les zones volcaniques. De plus, la compacité de ces roches en fait un matériau difficile à travailler, dont l'extraction nécessite de l'explosif, et la réduction granulométrique d'importants moyens mécaniques. Si les conditions de gisement et d'exploitation de ces matériaux en font une ressource moins universelle que la première, les performances des granulats qui en sont issus sont excellentes et en font un matériau de premier choix. La troisième famille de granulats est issue des roches massives calcaires. Hormis leur composition minéralogique, qui leur confère quelques propriétés différentes des « éruptives » et peuvent notamment les exclure de certains usages, ces roches se distinguent des précédentes par leur conditions de gisement. Formées dans des mers, lacs ou lagunes, elles sont généralement incluses dans des séries sédimentaires épaisses, et localisées dans des bassins bien définis. Il s'agit donc aussi d'une ressource moins répandue que les granulats alluvionnaires.

A ces trois catégories de roches naturelles peut en être ajoutée une quatrième, celle des granulats recyclés et des sous-produits industriels (OFRIR). Issus de la démolition d'ouvrages antérieures ou de processus d'élaboration de l'industrie lourde, leurs gisements sont par définition localisés soit à proximité de zones urbanisées où ont lieu la majorité des démolitions, soit dans les gros pôles industriels. La volonté d'utiliser de tels matériaux en génie civil est plus souvent motivée par le souci d'éviter une mise en décharge que par la qualité réelle des granulats qui en sont issus, celle-ci s'avérant très variable en fonction de l'origine de la ressource. De plus, la quantité disponible de ces matériaux est relativement marginale par rapport aux besoins globaux en granulats (Fig.2).

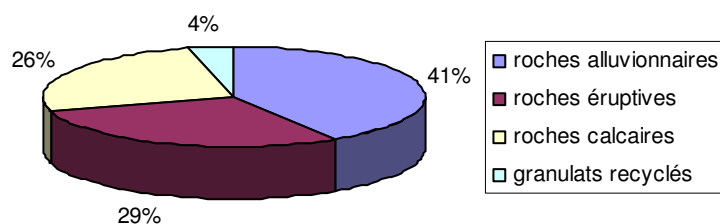


Fig. 2 : Répartition de la production nationale en 2004, en millions de tonnes d'après (UNPG, 2004)

Au delà de l'aspect géologique qui pilote la répartition géographique des gisements, la notion de ressource est aussi subordonnée à des aspects économiques. En effet, pour qu'un massif rocheux soit potentiellement exploitable, il est nécessaire que la production correspondante réponde à un besoin, et qu'elle puisse satisfaire ce besoin à des coûts compétitifs. En d'autres termes, les caractéristiques d'une carrière dépendent de celles des marchés qu'elle dessert.

Dans la suite, les roches éruptives et calcaires seront regroupées sous le terme de roches massives.

II.3- L'élaboration des granulats naturels en carrière

Quelque soit la famille considérée, la production de granulats peut se décomposer en deux grandes principales opérations que sont l'extraction et le traitement. Entre ces deux phases principales, une étape intermédiaire pouvant être nommée « chargement et transport » permet l'acheminement depuis la zone d'extraction jusqu'à l'installation de traitement.

II.3.1- L'extraction

II.3.1.1- La découverte

Cette première opération consiste à décaper les terres inexploitées situées au dessus des niveaux à exploiter : il s'agit principalement des terres végétales et des roches très altérées ou « stériles de découverte » (Fig.3). Ces niveaux vont être, autant que possible, « retirer » mécaniquement. La terre végétale est transportée et stockée à part, sur le site sous forme de merlon, en attente d'être réutilisée lors du réaménagement du site à la fin de l'exploitation du gisement. Les matériaux très altérés sont également stockés séparément sur l'enceinte du site.

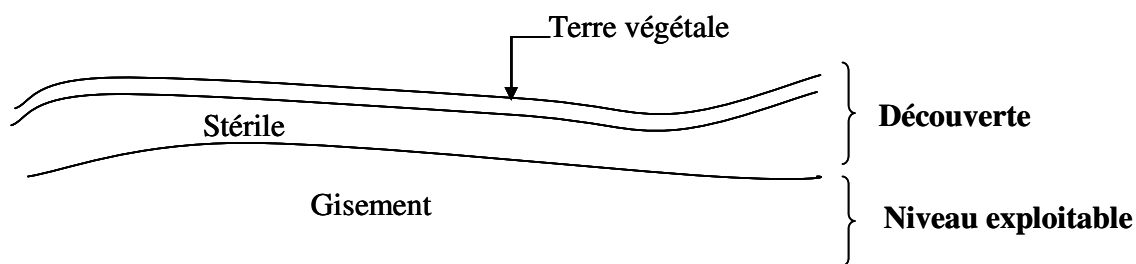


Fig. 3 : Structure verticale d'un gisement inexploité

Une fois le gisement « mis à nu », il existe différentes techniques d'extraction qui diffèrent selon les caractéristiques du gisement et de la nature de la roche exploitée.

II.3.1.2- Les méthodes d'extraction de granulats issus de roches massives

Pour ce type de gisement à forte cohésion, l'extraction repose sur l'utilisation d'explosifs. Les tirs de mine provoquent l'abattage d'une grande quantité de matériaux éclatés. Pour l'exploitant, le tir constitue la première étape importante du processus d'élaboration des granulats. Chaque tir a une importance majeure non seulement sur les résultats proprement dit du tir mais également sur l'ensemble des opérations à l'aval que sont le chargement, le transport et le concassage/broyage. En effet, de nombreux paramètres interfèrent dans cette opération qui se regroupent sous plusieurs aspects bien distincts mais intimement liés (Fig.4) (Sifre et Dumouza, 2002).

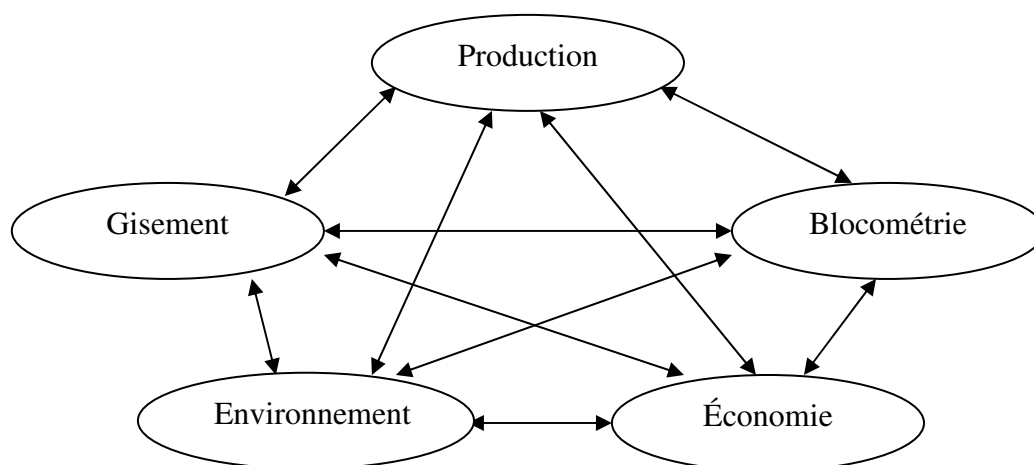


Fig. 4 : Les cinq principaux critères d'un tir de mine d'après (Sifre et Dumouza, 2002)

L'exploitant se doit de connaître les caractéristiques du gisement de façon la plus précise possible : ce dernier pouvant présenter des hétérogénéités avec des types de roches devant être traités différemment (existence de fracturations ou de zones d'altération différentes, présence ponctuelle d'eau...). Concernant le critère « production », il est clairement évident que le volume de roches abattu est en relation avec les objectifs de production fixés, eux-mêmes en adéquation avec les besoins de l'exploitation. La blocométrie constitue pour l'exploitant un objectif important voire primordial pour le carrier. En effet elle doit être adaptée à la fois, aux capacités de chargement des engins de reprises mais aussi au diamètre d'entrée du concasseur primaire. De plus, l'ensemble de paramètres du tir va ou non être à l'origine de nuisances de nature différentes : nuisances sonores, vibrations et projections.

L'exploitant se doit de configurer ces tirs d'abattage de façon à diminuer autant que faire se peut ces contraintes. Enfin, l'ensemble des différents critères précédents vont très fortement influencer les coûts et les cadences de production. A titre d'exemple, si la blocométrie n'est pas satisfaisante, l'exploitant est contraint d'effectuer un débitage secondaire du tout venant à l'aide d'un brise-roche et donc doit disposer de ce type d'engin (ou le sous-traité). Ainsi, chaque tir doit et est programmé selon un « plan de tir » précis définissant les différents paramètres de ce dernier (Fig.5) que sont le diamètre de foration, le choix des explosifs, le nombre de rangée, la banquette, l'amorçage, la séquence d'initiation, le rapport de maille, la surprofondeur, le bourrage et l'inclinaison du trou (Dumouza *et al.*, 2002).

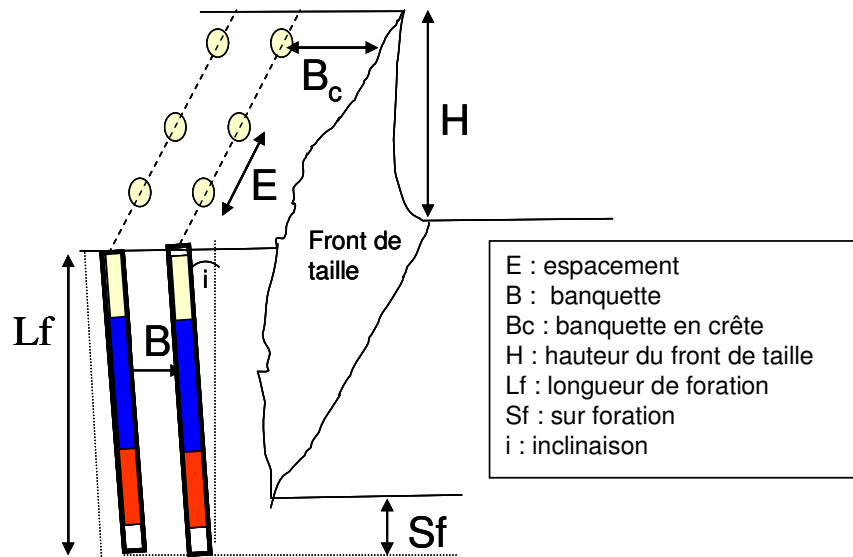


Fig. 5 : Les paramètres de tir (Boilat et Marchal, 1993)

II.3.1.3- Les méthodes d'extraction des granulats issus de roches meubles

Il existe deux méthodes principales d'extraction reposant sur la présence ou non d'eau au sein du gisement. En effet, la position du niveau de la nappe aquifère par rapport au toit du gisement constitue le facteur prédominant quant aux choix des moyens matériels à mettre en œuvre (Prax, 1990).

Lorsque le gisement à exploiter se situe au dessus du niveau d'eau (exploitation hors eau), l'extraction des matériaux meubles peut se faire directement par l'intermédiaire d'engins traditionnels de travaux publics tels que pelles ou chargeurs. L'extraction peut s'effectuer par le haut, on parlera alors d'extraction « en fouille » ou par le bas lors d'une exploitation « en butte ». Dans les deux cas, les fronts d'extraction ne peuvent excéder 8 à 10 mètres (Prax, 1990). Si l'épaisseur du gisement dépasse ces valeurs, l'exploitation est conduite sur plusieurs paliers.

Lorsqu'une partie du gisement est située sous le niveau d'eau (exploitation en eau), l'extraction des matériaux meubles peut se faire par l'intermédiaire d'engins flottants tels que dragues à godet, dragues suceuses. Si le gisement est peu profond, l'extraction peut alors se faire par l'intermédiaire de pelles hydrauliques ou de pelles à câbles équipées en dragueline.

II.3.2- Le chargement et le transport

Les opérations de transport des matériaux consistent, après chargement, à acheminer les matériaux brut, aussi appelés le tout-venant, du front d'extraction au poste primaire de l'installation de traitement. Le but recherché, à des fins d'optimisation économique, est de limiter au maximum, et ce, pendant toute la durée de l'exploitation, les distances séparant les différents points d'extraction de l'emplacement de l'installation de traitement (Lot et De Larupelle, 1990).

II.3.2.1- La flotte d'engins adaptés aux granulats issus de roches massives

Le transfert des matériaux entre le front d'extraction et l'installation de traitement peut s'effectuer soit en continu, par transporteurs à bandes (appelés aussi convoyeurs à bandes ou bandes transporteuses (Fig.6), soit en discontinu, au moyen des engins roulants communément appelés dumpers ou tombereaux ; ces derniers ayant été préalablement chargés par des engins de reprise tels que les chargeurs ou pelles mécaniques (Fig.7).



Fig. 6 : Transport par convoyeurs à bandes (à gauche)

Fig. 7 : Transport par engins roulants (à droite)

II.3.2.2- La flotte d'engins adaptés aux granulats issus de roches meubles

Les opérations d'extraction et de chargement sont généralement confondues sur les exploitations de matériaux alluvionnaires (Prax, 1990). Les différents moyens précédemment cités pour le chargement/transport dans le cas d'une exploitation de roches massives, en l'occurrence transport continu ou discontinu, correspondent également à ceux utilisés dans le cas des exploitations de roches alluvionnaires (roches meubles) auquel peut être rajouté l'emploi de bateaux ou de barges dans le cas d'exploitations immergées loin des rives. L'utilisation couplée de plusieurs possibilités de manutention s'avère très souvent la solution la plus efficace. A titre d'exemple, sur un gisement en eau, le matériau extrait (par pelle dragline) va être déposé, sous forme de cordon afin d'être essoré. Un chargeur sur pneu va reprendre le tout venant « sec » et assurer l'approvisionnement d'une trémie mobile d'alimentation de convoyeurs à bandes. Ces derniers, installés sur le toit du gisement peuvent être fixes ou déplaçables en fonction de l'avancée de l'exploitation (Fig.8).

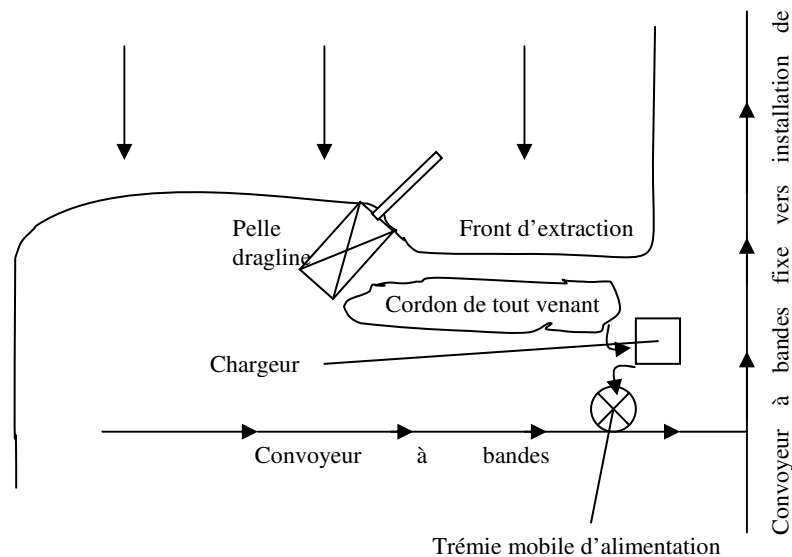


Fig. 8 : Exemple de transport couplé : chargeur / convoyeurs à bandes déplaçables et fixes (Prax, 1990)

II.3.3- Le traitement

Une fois le matériau extrait, une étape d'élaboration est nécessaire afin d'acquérir les caractéristiques requises à des fins commerciales. Cette étape est réalisée dans des installations automatisées généralement situées sur le site de la carrière que l'on dénommera « installation de traitement et d'élaboration » dans ce mémoire. Selon la provenance du granulat considéré, différentes opérations peuvent avoir lieu successivement pour obtenir une gamme de granulats qui répond aux besoins de la clientèle, en l'occurrence, l'exploitant procède successivement à :

- l'élimination des impuretés,
- le stockage primaire
- le concassage / broyage,
- le criblage,
- le lavage,
- le stockage et l'expédition vers les chantiers.

Des précisions relatives à chacune de ces différentes phases du traitement sont apportées ci-dessous.

II.3.3.1- L'élimination des impuretés

Cette opération consiste à séparer, par scalpage, les matériaux les plus fins, susceptibles de contenir les matières indésirables telles que les argiles par exemple, des matériaux plus gros (Arquié *et al.*, 1990^b). La partie ainsi éliminée est communément nommée le « tout-venant de précriblage ». Son usage potentiel est similaire à celui des matériaux issus de la découverte, à savoir le remblai, ou alors la revalorisation de la fraction saine qu'il contient par élimination de la fraction argileuse (Balanec, 2002).

II.3.3.2- Le stockage primaire ou préstock

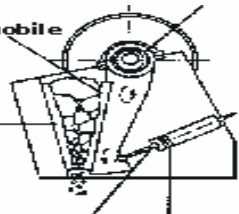
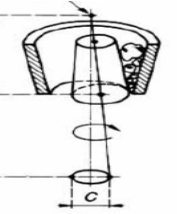
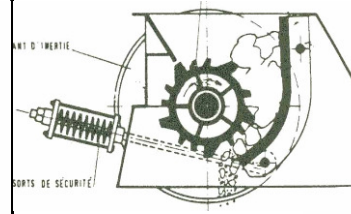
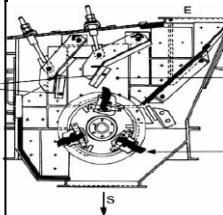
Le préstock constitue la réserve de matière première de l'installation d'élaboration afin de fournir une alimentation à débit constant à partir du poste secondaire (Yernaux et Maldonado, 1990). Il est obtenu à partir du tout venant exempt de ses impuretés, déversé dans le poste primaire au sein duquel il va subir un concassage primaire. Sa fonction principale est de constituer un stock de matériaux destinée à pallier des arrêts d'approvisionnement de l'installation. Par exemple, dans le cas d'un transport depuis la zone d'extraction, par des engins roulants (dumpers ou chargeurs), l'alimentation du poste primaire s'effectue obligatoirement de manière discontinue. Or, l'installation d'élaboration doit, au contraire, fonctionner de manière continue, ce qui est rendu possible par la mise en place d'une zone de préstockage (Arquié *et al.*, 1990^b).

Ainsi le préstock constitue le matériau de départ à partir duquel l'ensemble des coupures granulaires commercialisées va être élaboré par simple criblage des préconcassés ou lors de phases secondaires ou tertiaires.

II.3.3.3- Le concassage / broyage

Les différentes phases de concassage permettent de réduire la taille des matériaux. La fabrication de granulats à partir de roches massives nécessite toujours plusieurs opérations de concassage. Le concassage passe alors par différentes phases : primaire, secondaire, tertiaire et voir même quaternaire ; une sélection des matériaux s'effectue entre chacun de ces concassages successifs. Dans le cas de granulats issues de roches meubles, cette opération n'est pas systématique et s'effectue uniquement pour les éléments de taille importante (galets, gros graviers) ou dans des cas particuliers comme, par exemple, une utilisation dans les assises routières qui exigent un minimum d'angularité des granulats (Arquié *et al.*, 1990^b). Le tableau 1 présente les principaux types de concasseurs utilisés en exploitation de carrière et respectivement le phénomène permettant le concassage.

Tableau 1 : Les principaux concasseurs utilisés

	Concasseur à mâchoires	Concasseur giratoire	Concasseur à cylindres	Concasseur à percussions
phénomène	compression	compression	écrasement	projection
illustration				

Pour chaque phase du traitement (primaire, secondaire, tertiaire voir quaternaire), l'appareil le plus adapté peut être défini à partir de cinq critères principaux (Blazy *et al.*, 1992) :

- la capacité d'admission qui fixe les dimensions des plus gros blocs admissibles,
- le rapport optimal de réduction,
- la distribution granulométrique des produits à la sortie,
- le coefficient de forme moyen des fragments obtenus,
- le coût de sa maintenance, qui est fonction de la robustesse, de l'efficacité des dispositifs de sécurité, de la facilité d'entretien et de la durée de vie des pièces d'usure.

Le choix des concasseurs affectés à ces opérations est donc évidemment très lourd de conséquences pour le carrier puisque, d'une part les concasseurs représentent un investissement important et, d'autre part, la productivité de l'installation, la qualité et le prix de revient des granulats en dépendent énormément. Habituellement, le concasseur primaire est un concasseur à mâchoires, les autres concasseurs étant des giratoires. Aujourd'hui, on trouve également des concasseurs primaires giratoires.

II.3.3.4- Le criblage

Le criblage est une opération consistant à séparer une population de matériaux suivant leurs dimensions en deux (ou plusieurs) sous-ensembles. Pour cela, on utilise une surface perforée qui laisse passer les fragments dont les dimensions sont inférieures à celles des perforations et qui retient les fragments de tailles supérieures (Houot et Joussemet, 1995). Les deux fonctions principales de cette opération sont (Delille et Moutot, 1990) :

- le criblage technique destiné à orienter les granulats au sein de l'installation de traitement (vers des concasseurs/broyeurs, vers d'autres cribles,...),
- le criblage de classement dont l'objectif va être de trier les matériaux selon des spécifications dimensionnelles données.

Aucune opération industrielle ne produisant de résultats parfaits, l'efficacité d'un crible varie entre 75 à 95 % et entre 60 à 90 % en zone critique (Houot et Joussemet, 1995). La fraction critique (ou grains difficiles) correspond aux grains dont la dimension est comprise entre 0,7 et 1,5 fois celle de la maille du crible. En effet, la probabilité de passage pour un grain de dimension égale à 0,9 fois celle de l'ouverture est d'environ 1 %, c'est-à-dire que pour cribler la totalité des grains de cette dimension, il faut un minimum de 100 ouvertures sur la trajectoire de chaque grain. Les autres facteurs affectant cette capacité, indépendamment des paramètres liés au crible, sont les suivants (Houot et Joussemet, 1995) :

- le pourcentage de passant, c'est-à-dire de grains de maille inférieure à celle du crible ; plus il est faible et plus la difficulté d'extraire ce passant est grande,
- le pourcentage en eau qui agit sur la viscosité et augmente les probabilités de colmatage des particules fines,
- la forme des grains qui influe sur la capacité de séparation des grains.

Il existe de nombreux types de cribles mais les plus répandus dans les carrières restent les cribles vibrants qui peuvent être équipés de une à quatre surfaces criblantes (Houot et Joussemet, 1995). Les phénomènes qui favorisent l'avancement des matériaux peuvent être décomposés selon deux composantes, en l'occurrence l'inclinaison des plans de criblage (composante verticale) et l'action de la vibration (composante horizontale) (Delille et Moutot, 1990).

II.3.3.5- Le lavage

Débourber, laver ou dépoussiérer permet d'obtenir des granulats propres. Le traitement des granulats par voie humide vise à améliorer la propreté des matériaux par un lavage énergétique qui entraîne les produits indésirables et notamment les argiles.

La majorité des ces produits est éliminée lors du scalpage mais des nouveaux traitements sont souvent nécessaires au cours de l'élaboration afin d'affiner la propreté (Archimbaud *et al.*, 1990).

En effet, La présence de boues, argiles ou de poussières mélangées aux matériaux ou enrobant les grains, empêche leur adhérence avec les liants (ciments, chaux, laitier ou bitume), ce qui interdit alors leur utilisation. Les opérations de criblage et de lavage sont souvent réalisées conjointement, une rampe de jets d'eau étant disposée au dessus du crible.

II.3.3.6- Le stockage et l'expédition vers les chantiers

En fin de traitement, on obtient des produits de qualité répondant à des critères et exigences bien précis (nature des granulats, forme, taille, angularité, ...). Une fois traités et classés par granulométrie, les granulats sont acheminés vers les aires de stockage, soit sous forme de stocks au sol ou dans des trémies ou des silos. Les produits stockés sont acheminés vers leur destination finale selon différents modes de transport, en fonction de la demande du client et des possibilités existantes. On considère qu'en moyenne, le prix de la tonne de granulats rendue à sa destination finale double tous les 50 km (UNPG, 2006). Valable pour un transport routier, cette estimation est moindre pour un transport ferroviaire, et plus faible encore pour un transport fluvial ; néanmoins ces deux derniers modes de transport ne deviennent réellement intéressants que lorsque le gisement d'une part, et une majorité des utilisateurs finaux d'autre part, se situent le long des infrastructures concernées. Ainsi, l'essentiel du transport est réalisé par la route. En effet, la répartition entre ces différents modes de transport est approximativement de 85/90% pour la route, 5/5% pour le train et 10/5% par voie maritime (Yernaux et Maldonado, 1990) ; (UNPG, 2004). Par ailleurs, une augmentation régulière de la distance moyenne, entre les carrières et les lieux de consommation, est observée. D'environ 20 km dans les années 60, elle est actuellement de 35 km et devrait atteindre 50 km en 2010 (IFEN, 2002).

II.4- Le suivi de la production et de la gestion du site

Tout au long du processus de fabrication, le carrier procède à des opérations régulières de contrôle de la qualité portant sur la chaîne de production et sur la conformité du produit fini (granulométrie, forme, dureté, propreté...). De plus, dans le cadre de la libre circulation des produits réglementés en Europe, est mis en place, à partir de juin 2004, le marquage CE pour les granulats. Le marquage CE vient de la mise en application de la directive européenne « Produits de construction » 89/106 de décembre 1988 (Directive, 1988) (transposée en droit français par le décret n°92-647 du 8 juillet 1992 relatif à l'aptitude à l'usage des produits de construction (Décret, 1992)). En effet, après le marquage NF, acte volontaire, le marquage CE est une obligation pour tous les carriers. L'objectif de ces contrôles est de vérifier le respect des exigences en matière de santé, de sécurité, de traçabilité, de protection du consommateur et de l'environnement. Pour pouvoir apposer le marquage CE sur ses granulats, le producteur doit avoir établi un " système de Maîtrise de Production des Granulats " (MPG), dont le contenu est précisé dans les normes, et qui inclut des essais sur ses produits à des fréquences définies. Pour l'adaptation du marquage CE aux granulats, deux systèmes ont été retenus : les systèmes d'attestation de conformité " 2+ " et " 4 ". Dans le cas d'attestation de conformité " 2+ ", la certification sera établie par un organisme notifié qui effectuera un audit initial puis une surveillance continue. Dans le système " 4 ", le producteur de granulats rédige une simple déclaration de conformité CE où il déclare maîtriser la production et les caractéristiques des granulats.

Par ailleurs, l'Union Nationale des Industries de Carrières (UNICEM) a élaboré, en 2004, une charte environnement visant à concilier développement économique, respect de l'environnement et écoute des parties intéressées.

A travers cette charte, l'entreprise signataire s'engage à faire progresser ses sites en appliquant 80 "bonnes pratiques" définies par la profession et identifiées au sein d'un « Référentiel de Progrès Environnemental » (RPE). Sur ces 80 questions, 52 correspondantes à des enjeux environnementaux majeurs sont dites qualifiantes. Leur validation est une condition indispensable pour la qualification au titre de la charte environnement. Un auditeur externe veille à sa mise en place effective sur chacun des sites et valide l'atteinte des différents niveaux de performances ; au nombre de 4 et qui sont définis sur le pourcentage de bonnes pratiques mises en œuvre : de 20 à 40% le niveau 1, 41 à 65% le niveau 2, 66 à 95% le niveau 3. L'obtention du niveau 4 est conditionnée par la mise en œuvre d'au moins 95% de ces pratiques. Pour ce faire, un auditeur-conseil, externe à l'entreprise, réalise un audit initial qui permet premièrement de positionner l'exploitation et deuxièmement de mettre en place, conjointement avec le responsable du site, un plan d'action pour atteindre progressivement le niveau 4. Par la suite, l'exploitation est de nouveau auditée afin de valider les nouvelles démarches mises en œuvre puis d'assurer leur maintien.

II.5- La réglementation relative aux exploitations de carrière

Un dernier aspect à prendre en compte pour compléter la définition de la ressource en granulats est le contexte réglementaire. En effet, un certain nombre de contraintes s'imposent à l'ensemble des exploitations, quelque soit leur nature ou leur localisation.

II.5.1- L'historique

La réglementation sur les carrières trouve son origine dans la loi du 21 avril 1810 (Loi, 1810) qui classait les masses de substances minérales ou fossiles, renfermées au sein de la terre ou existantes à la surface, en trois catégories : les mines, les minières et les carrières. Pour chacune de ces catégories, une liste des substances visées était définie par son Titre 1^{er} ; Ainsi, " Les Carrières renferment les ardoises, les grès, pierre à bâtir et autres, les marbres, granites, pierre à chaux, pierre à plâtre, les pouzzolanes, les trass, les basaltes, les laves, les marnes, craies, sables, pierre à fusil, argiles, kaolin, terres à foulon, terre à poterie, les substances terreuses et les cailloux de toutes nature, les terres pyriteuses regardées comme engrais, le tout exploité à ciel ouvert ou avec des galeries souterraines ". La loi de 1810 définit également le contrôle des mines et carrières. La surveillance de ces exploitations était exercée, sous les ordres du Ministre de l'Intérieur et des Préfets, par les ingénieurs des mines ; elle portait notamment sur la sécurité publique et la sûreté des mineurs. En effet, l'article 81 stipule que " L'exploitation des carrières à ciel ouvert a lieu sans permission, sous la surveillance de la police, et avec l'observation des lois ou règlements généraux ou locaux ". Le décret impérial du 18 novembre 1810 (Décret, 1810) a créé un corps d'inspecteurs des mines et carrières. Avec ce décret, le territoire français formait douze divisions sous le rapport du service des mines et carrières (titre II, §1^{er}, Art.9). Parmi les fonctions des ingénieurs ordinaires, l'article 28 précise " qu'ils visiteront au moins une fois par an chacune des exploitations qui existe dans leur arrondissement respectif ". L'article 40 prévoyait " qu'ils visitent les carrières et donnent des instructions pour la conduite des travaux, sous le rapport de la sûreté et de la salubrité ".

Jusqu'en 1938, l'exploitation des carrières à ciel ouvert restait soumise à des mesures définies à partir d'un règlement type, par des règlements départementaux pris sous forme de décrets en Conseil d'Etat. Le décret-loi du 24 mai 1938 a laissé à ces règlements toutes leurs valeurs, mais il a rétabli la faculté (texte original de la loi de 1810), d'édicter des règlements généraux qui doivent être pris sous forme de décrets simples (Instruction, 1955). Le décret du 15 mars 1954 (Décret, 1954) a été le premier de ceux-ci. Il concernait la conduite générale des travaux et définissait les principes fondamentaux en laissant aux ingénieurs en chef des mines un large pouvoir d'appréciation et de décision.

Il faudra attendre le 16 août 1956 pour que soit publié le "code minier" rassemblant, sous forme codifiée, les textes essentiels relatifs à l'exploitation des gîtes minéraux. (décret de la loi du 26 mai 1955).

En raison de la prise en compte des problèmes de nuisances pour l'environnement et pour la qualité de vie, on assiste à partir de 1970 à une mise en place d'une véritable réglementation en matière d'autorisation d'exploitation des carrières. C'est la loi du 2 janvier 1970, modifiant le Code Minier qui supprime le système déclaratif en vigueur. Voilà sans doute l'étape la plus importante dans l'évolution du cadre juridique applicable aux carrières, car leur ouverture est désormais soumise à autorisation préfectorale préalable. Cette loi instaure une réglementation d'exploiter les carrières mais maintient le principe selon lequel le droit de propriété du sol emporte également propriété du sous-sol.

Le décret n° 71-792 du 20 septembre 1971 complétant la loi de 1970 introduit notamment les premières dispositions relatives à la remise en état des lieux après exploitation. Il s'agit du premier texte réglementaire qui introduit la notion d'autorisation préalable délivrée par le Préfet pour des carrières dont la superficie dépasse 2.000 ou 5.000 m² et la nécessité de remise en état des lieux.

Le décret n° 79-1108 du 20 décembre 1979 détaille les procédures à suivre pour les autorisations de mise en exploitation des carrières, les renouvellements, les extensions, les retraits et les renoncations. Les demandes d'ouvertures de carrières comportent désormais une étude d'impact et les plus importantes (superficie supérieure à 5 ha ou production annuelle maximale supérieure à 150.000 tonnes) sont soumises à enquête publique.

II.5.2- La réglementation en vigueur et conditions d'exploitation à l'échelle temporelle

Le Règlement Général des Industries Extractives (RGIE), toujours en application, a été institué par décret en mai 1980 (Décret, 1980). Le RGIE comporte aujourd'hui 16 titres qui concernent l'hygiène et la sécurité dans les carrières.

La loi Saumade (Loi, 1993) soumet les carrières à la législation des installations classées en supprimant l'autorisation au titre du Code minier, à l'exception de la sécurité et de la santé des travailleurs qui reste sous le Code minier. Cette loi inclut les carrières dans le champ de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 (Loi, 1976) et généralise, pour ces activités, le régime d'autorisation avec étude d'impact et enquête publique. Elle oblige les exploitants à constituer des garanties financières destinées à assurer, dans tous les cas, la remise en état des carrières après exploitation. Cette loi limite l'autorisation d'exploiter à 30 ans au maximum (15 ans, renouvelables pour les terrains boisés soumis à autorisation de défrichement).

La loi sus-citée a donné lieu à une série de textes d'application et notamment le décret du n° 94-485 du 9 juin 1994 (Décret, 1994^a), depuis lequel sont considérées comme carrières les activités ainsi désignées par la nomenclature des installations classées (rubrique 2510) :

1/ Exploitation de carrières au sens de l'article 4 du code minier et de l'article 2 du décret n° 55.586 du 20 mai 1955 modifié portant réforme du régime des substances minérales dans les départements de la Guadeloupe, de la Guyane, de la Martinique et de la Réunion, ainsi que :

- a) les opérations de dragage des cours d'eau et des plans d'eau (à l'exception des opérations présentant un caractère d'urgence destinées à assurer le libre écoulement des eaux), lorsque les matériaux sont utilisés et lorsqu'elles portent sur une quantité à extraire supérieure à 2 000 tonnes,

b) Les affouillements du sol à l'exception des affouillements rendus nécessaires pour l'implantation des constructions bénéficiant d'un permis de construire et des affouillements réalisés sur l'emprise des voies de circulation, lorsque les matériaux prélevés sont utilisés à des fins autres que la réalisation de l'ouvrage sur l'emprise duquel ils ont été extraits et lorsque la superficie d'affouillement est supérieure à 1000 mètres carrés ou lorsque la quantité de matériaux à extraire est supérieure à 2000 tonnes.

2/ Exploitation, en vue de leur utilisation, des masses constituées par des haldes et terrils de mines et par les déchets d'exploitation de carrières (à l'exception des cas visés à l'article 1er du décret n° 79.1109 du 20 décembre 1979 pris pour l'application de l'article 130 du code minier), lorsque la superficie d'exploitation est supérieure à 1000 mètres carrés ou lorsque la quantité de matériaux à extraire est supérieure à 2000 tonnes par an.

Par ailleurs, l'arrêté du 22 septembre 1994 (Arrêté, 1994) fixe les prescriptions applicables aux exploitations de carrières concernant leurs aménagements et leurs conduites et fixent les dispositions concernant la prévention des pollutions et des enjeux environnementaux.

Le montant des garanties financières de remises en état des exploitations est déterminé selon les directives fixées par l'arrêté du 10 février 1998 (Arrêté, 1998). Il est, ainsi, établi selon un mode de calcul, décrit en annexe 1 de l'arrêté sus-cité, différent suivant 3 catégories distinctes d'exploitation : carrières de matériaux meubles en nappe alluviale ou superficielle, carrières en fosse ou à flanc de relief et autres carrières à ciel ouvert.

II.5.3- Les conditions d'exploitation à l'échelle du territoire : Schémas Départementaux de Carrières

La loi n° 93-3 du 4 janvier 1993 introduit l'obligation, par son article 8, de la réalisation d'un Schéma Départemental des Carrières. Elle confirme, dans chaque département, l'existence d'une commission départementale des carrières, instance consultative présidée par le Préfet, qui a pour mission d'émettre un avis motivé sur les demandes d'autorisation et d'élaborer le Schéma Départemental de Carrière. Ce dernier doit constituer un instrument d'aide à la décision du Préfet lorsqu'il autorise les exploitations de carrières en application de la législation des installations classées. L'article 8 de la loi du 4 janvier 1993 stipule que : « Le schéma définit les conditions générales d'implantations des carrières dans le département. Il prend en comptes l'intérêt économique national, les ressources et les besoins en matériaux du département et des départements voisins, la protection des paysages, des sites et des milieux naturels sensibles, la nécessité d'une gestion équilibrée de l'espace, tout en favorisant une utilisation économe des matières premières. Il fixe les objectifs à atteindre en matière de remis en état et de remaniement des sites ».

Le décret n° 94-603 du 11 juillet 1994 relatif aux Schémas Départementaux de Carrières, pris en application de la loi susvisée, précise le contenu du document, les modalités de son élaboration, de sa diffusion et de sa mise à jour ultérieure. Ainsi, la rédaction du projet de schéma est confiée à un comité de pilotage dont les membres appartiennent à la commission départementale des carrières (Décret, 1994^b) composée de trois groupes de travail correspondant aux différents thèmes du schéma (Tableau 2).

*Tableau 2 : Organisation du Schéma Départemental des Carrières
d'après Circulaire, 1995^a*

Ressource	Environnement	Besoin/Transport
inventaire des ressources	analyse de l'impact qualitatif des carrières sur l'environnement	analyse des besoins actuels et à venir en matériaux
analyse des modes d'approvisionnements	détermination des zones devant être protégées compte tenu de la qualité et de la fragilité de leur environnement (analyse environnementale)	
orientations et objectifs dans le domaine de l'utilisation économe et rationnelle des matériaux,	orientations et objectifs à atteindre dans les modes d'approvisionnement des matériaux afin de réduire l'impact des extractions sur l'environnement	analyse des différentes modalités de transport des matériaux et des orientations à privilégier dans ce domaine
	orientations à privilégier en matière de réaménagement de carrières	

A titre d'exemple, certaines exploitations peuvent avoir un impact notable sur l'eau, notamment, celles autorisées à extraire en nappe alluviale. Or, la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau a créé les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE). Il convient donc que les orientations et objectifs des SDC d'une part et ceux des SDAGE et SAGE d'autre part, soient cohérents et compatibles entre eux. La réglementation (Circulaire, 1995^b) prévoit que les autorisations de carrières doivent être compatibles avec les orientations et objectifs définis par le schéma. De ce fait, les autorisations doivent respecter les différents textes de la législation des installations classées (dans l'exemple les objectifs et orientations définis dans les SDAGE et SAGE).

Par ailleurs, le Schéma Départemental des Carrières n'est pas opposable aux documents d'urbanisme, notamment aux Plan Local d'Urbanisme (PLU qui a remplacé l'ancien Plan d'Occupation des Sols, POS). Il existe actuellement un certain nombre de documents d'urbanisme (PLU, POS, Cartes communales, ...) qui interdisent l'exploitation de carrières. Ce dernier peut alors être révisé, au besoin à l'aide d'une procédure d'intérêt général ; cette révision peut être mise en œuvre dès la publication du schéma, sans attendre une demande d'exploitation de carrière. Elle se fait en concertation avec les différents membres associés (Etat, collectivités territoriales, chambres consulaires).

L'Article 6 du décret du 11 juillet 1994 (Décret, 1994^c) stipule que le schéma doit être révisé dans un délai maximum de 10 ans à compter de son approbation par arrêté préfectoral et selon une procédure identique à son adoption.

Le SDC représente donc la synthèse d'une réflexion approfondie et prospective non seulement sur les pressions générées par l'activité des carrières sur l'environnement d'un point de vue qualitatif, mais à un degré plus large, sur la politique des matériaux dans le département.

II.5.4- L'étude d'impact

L'étude d'impact est également une obligation réglementaire. En effet, en application de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976, toute demande d'autorisation au titre des installations classées pour la protection de l'environnement doit être accompagnée d'une étude d'impact. Décrite dans le décret du 21 septembre 1977 (Décret, 1977), elle vise à identifier les conséquences futures d'un projet ainsi que les moyens mis en œuvre pour les limiter. Elle présente successivement :

- **l'analyse de l'état initial du site et de son environnement** qui porte notamment sur les richesses naturelles et les espaces naturels agricoles, forestiers, maritimes ou de loisirs, ainsi que sur les biens matériels et le patrimoine culturel susceptibles d'être affectés par le projet,

- **l'analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents de l'installation sur l'environnement** et en particulier sur les sites et paysages, la faune et la flore, les milieux naturels et les équilibres biologiques, sur la commodité du voisinage (bruits, vibrations, odeurs, émissions lumineuses) ou sur l'agriculture, l'hygiène, la santé, la salubrité et la sécurité publiques, sur la protection des biens matériels et du patrimoine culturel ; cette analyse précise notamment l'origine, la nature et la gravité des pollutions de l'air, de l'eau et des sols, le volume et le caractère polluant des déchets, le niveau acoustique des appareils qui seront employés ainsi que les vibrations qu'ils peuvent provoquer, le mode et les conditions d'approvisionnement en eau et d'utilisation de l'eau,

- **les raisons pour lesquelles le projet présenté a été retenu**, notamment du point de vue des préoccupations d'environnement, parmi les solutions envisagées,

- **les mesures envisagées** par le demandeur pour supprimer, limiter et si possible compenser les inconvénients de l'installation ainsi que l'estimation des dépenses correspondantes. Ces mesures font l'objet de descriptifs précisant les dispositions d'aménagement et d'exploitation prévues et leurs caractéristiques détaillées. Ces documents indiquent les performances attendues, notamment en ce qui concerne la protection des eaux souterraines, l'épuration et l'évacuation des eaux résiduelles et des émanations gazeuses, ainsi que leur surveillance, l'élimination des déchets et résidus de l'exploitation, les conditions d'apport à l'installation des matières destinées à y être traitées, du transport des produits fabriqués et de l'utilisation rationnelle de l'énergie,

- **les conditions de remise en état du site après exploitation.**

De plus et afin de faciliter la prise de connaissance par le public des informations contenues dans l'étude, celle-ci fera l'objet d'un résumé non technique.

II.6- Les étapes de la vie d'une carrière

Comme toute activité industrielle, l'industrie des carrières va générer des impacts sur le milieu environnant. Ces effets pouvant être directs ou indirects, temporaires ou permanents, négatifs ou positifs (Espaces pour demain, 2002). En outre, les pressions exercées vont être de nature et d'importances variables en fonction du type d'exploitation, de sa configuration et de son environnement de proximité. Le présent chapitre vise à présenter les différentes étapes d'une carrière et à définir les différents impacts occasionnés au cours de chacune d'entre elles.

II.6.1- Du projet à l'ouverture du site

Selon le principe d'un développement durable, l'ouverture d'une exploitation nécessite de concilier à la fois les impératifs économiques et la prise en compte de l'environnement humain, biologique et paysager. Depuis le moment où une exploitation est envisagée jusqu'à son ouverture effective, de nombreux acteurs sont mobilisés : carriers, administrations, élus et populations. Chacun d'entre eux dispose de moyens réglementaires, techniques et pratiques pour faciliter les prises de décision et aussi réduire les impacts sur l'environnement et les nuisances (Espaces pour demain, 2002). On rappelle que le cadre réglementaire relatif aux demandes d'autorisation préfectorale impose la réalisation d'une étude d'impacts préalablement à l'ouverture d'une exploitation de carrière. Par l'approche et l'analyse des différents points traités, ce type de document constitue une base de travail et de réflexion pour l'ensemble des acteurs concernés (élus, administration, public, exploitant, ...) qui les obligent à porter un regard sur les conséquences de l'implantation d'une nouvelle exploitation de carrière. En effet, elle permet notamment de mesurer l'importance des impacts, les possibilités réalistes de remise en état et d'apprécier, alors, en toute connaissance de cause, l'opportunité et le bien-fondé ou non du projet (Galin et Sionneau, 1990).

II.6.2- La phase d'exploitation

Tout au long de la période d'autorisation accordée par arrêté préfectoral, l'exploitant va extraire et élaborer les matériaux selon une procédure présentée en début de chapitre. Outre les grandes quantités de roches/sols déplacées au cours de cette période, différents échanges de matière et d'énergie, entrants et sortants de ce système sont relatifs à l'élaboration des granulats. Les effets sur l'environnement de ces différents échanges peuvent être multiples et différents selon le type d'exploitation considéré. L'ensemble des différents compartiments du cycle supergène (air, sol, eau) peut être impacté et ce à différentes échelles géographiques ; ces perturbations de milieu naturel pouvant eux-mêmes être à l'origine de modifications sur la biocénose originelle (faune et flore). Par ailleurs, l'Homme peut également « subir » des pressions au travers notamment des nuisances (bruit, vibration et poussières) mais aussi au travers des modifications paysagères.

II.6.3- La fin de l'exploitation et la remise en état

Au cours de la phase d'exploitation, nous avons vu que la production de granulats va considérablement modifier l'environnement immédiat du site. Or, d'un point de vue du développement durable, les carrières constituent une occupation temporaire du territoire sur lequel elle est implantée et l'usage ultérieur de ce dernier doit être prévu et intégré dès les premières démarches du projet. En effet, la remise en état du site est réfléchie de façon très précise avant l'exploitation car ses détails doivent être précisés dans l'étude d'impact.

Les notions de « remise en état » et de « réaménagement » sont très distinctement différenciées dans la réglementation (Circulaire n°96-52 du 2 juillet 1996). Si la première est une obligation d'un point de vue législatif, la seconde représente, quant à elle, un engagement purement volontaire.

Vis à vis de la remise en état, l'arrêté du 22/09/1994 et plus particulièrement son article 12, stipule qu'elle doit être achevée au plus tard à l'échéance de l'autorisation, sauf dans le cas de renouvellement de l'autorisation d'exploiter et comporter au minimum les dispositions suivantes :

- **la mise en sécurité** des fronts de taille : élimination des blocs instables, aménagement du pied du front de taille,

- **le nettoyage de l'ensemble des terrains**, notamment l'évacuation de tous les produits polluants et déchets. D'une manière générale, ce nettoyage consiste à supprimer toutes les structures n'ayant pas d'utilité après la remise en état du site,

- **l'insertion satisfaisante de l'espace** affecté par l'exploitation dans le paysage, compte tenu de la vocation ultérieure du site : revégétalisation, façonnage des berges du plan d'eau, etc.

Au moins 6 mois avant la date d'expiration de l'autorisation, l'exploitant doit déposer en préfecture une déclaration de fin de travaux, accompagnée d'un dossier comprenant un plan et un mémoire sur la remise en état. Le Préfet désigne alors un inspecteur des ICPE qui procédera à une visite du site et qui, si la situation est jugée convenable, dressera un procès verbal de recollement (Espaces pour demain, 2002). Ce document a pour conséquence directe que le site ne peut plus être considéré comme une carrière et que sa gestion doit alors être assurée par le propriétaire foncier du terrain. Toutefois, la responsabilité de l'exploitant peut être engagée pour des faits intervenus au cours de la période d'exploitation (exemple : pollution de la nappe phréatique mise à jour postérieurement à l'arrêt de l'activité).

II.6.4- L'après carrière

Une fois le site remis en état, l'opération de réaménagement, si elle a lieu, vise à valoriser l'ancienne exploitation sur le long terme et permettre de combiner à la fois préservation de l'environnement et utilité sociale. L'objectif de cette opération est que l'espace carrière devienne un élément harmonieusement intégré dans son environnement. Bien que le choix dépende du contexte hydrogéologique (Tableau 3), il résulte surtout d'un accord entre le propriétaire, l'exploitant, les pouvoirs publics et les futurs utilisateurs.

*Tableau 3 : Exemples de réaménagement possible de carrières
(d'après Espaces pour demain, 2002)*

Etat de l'exploitation	Conditions particulières		possibilités d'aménagement	conditions (indicatives) de réalisation
	Carrière	Environnement		
Carrières en eau	faible profondeur d'eau	Rural	* Zones naturelles humides (dont réserves ornithologiques) * Réserve de chasse	* Etendues petites et moyennes
			* Mise hors eau et réutilisation agricole et sylvicole	* S'assurer que la nappe ne sera pas polluée par le remblayage
		Périurbain et urbain	* Coupure dans l'urbanisme	* Pas de fluctuation importante du niveau de l'eau
			* Remblayage partiel ou total pour utilisation en zones vertes ou en zones constructibles	* Problèmes de qualités de remblai (chimiques et géotechniques)
	profondeur d'eau moyenne ou forte	Rural	* Pêche loisir / pisciculture * Baignade / barque	* Faible étendue * Température de l'eau suffisante
			* Bassin d'infiltration * Bassin de stockage d'eau	* Fond de carrière perméable * Volume de carrière utile important
		Périurbain et urbain	* Lotissement au bord de l'eau * Bases de loisirs	* Facilité d'aménagement des berges
Carrières à sec	en fosse	Rural	* Reconstitution de terrain agricole	* Moyennes et grandes surfaces * Bon drainage à assurer
			* Reboisement * Bassin d'infiltration	* Substratum perméable
		Périurbain et urbain	* Remblayage * Centre de stockage de déchets	* Problèmes de pollution possible
			* Parc / Zones résidentielles	* Faible profondeur * Drainage à assurer
			* Zones industrielles * Lac artificiel	* Drainage à assurer après étanchement du fond
	à flanc de relief : - parois meubles	Tout environnement	* Talutage et mise en végétation	
	- parois rocheuses	Vues éloignées	* Confortement et traitement de la paroi	* Patine artificiel ("camouflage")
		Vues rapprochées	* Eventuellement talus végétalisé	* Constitution d'un masque végétal
	- plancher de carrière	Rural	* Remise en végétation (prairie, agriculture, sylviculture)	* Apport de sol éventuel * Rôle de l'exposition
		Périurbain et urbain	* Parc de verdure * Zone résidentielle * Parc de véhicules * Zone industrielle * Zone de loisirs	* Orientation à considérer

Par ailleurs, dans certains cas, on peut observer sur le même site une combinaison de plusieurs catégories d'aménagement (Fig.9).



Fig. 9 : Exemple de réaménagement combiné

III- Méthodes d'évaluation environnementale - Indicateurs

Ce paragraphe présente les principales méthodes et outils d'évaluation environnementale pouvant être appliquées à un système tel que peut l'être une exploitation de carrière. Les deux méthodes d'évaluation environnementale qui y sont examinées, que sont l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et l'Évaluation des Performances Environnementales (EPE), reposent sur l'utilisation d'indicateurs.

III.1- Les méthodes et outils de l'évaluation environnementale

En effet ces deux méthodes sont des approches complémentaires. La première (ACV) est un outil d'évaluation environnementale orienté "produit" alors que la seconde (EPE) est, quant à elle, orienté "site industriel". La figure 10 schématise les champs d'évaluation respectifs des deux méthodes ainsi que celui du présent travail.

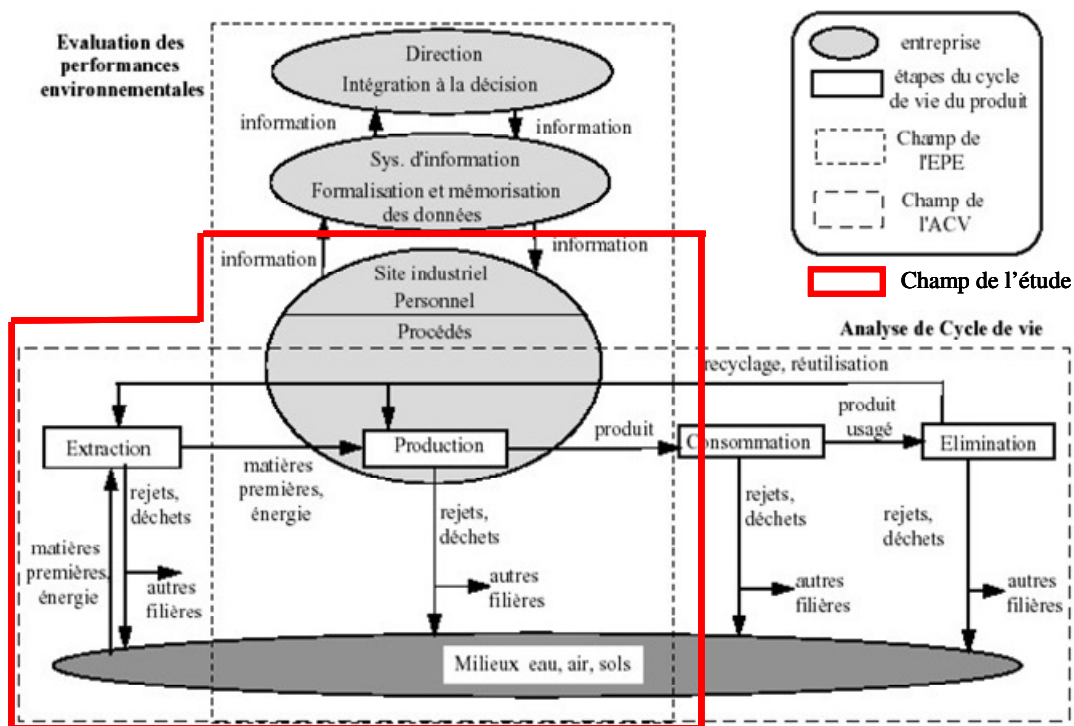


Fig. 10 : Positionnement du champ de l'étude vis à vis de l'ACV et de l'EPE
(Personne, 1998 modifiée)

III.1.1- L'Évaluation des Performances Environnementales (EPE)

L'outil de management environnemental, qu'est l'EPE, peut être considéré comme une technique complémentaire de l'ACV puisqu'elle porte sur l'évaluation des impacts ou des facteurs d'impacts environnementaux associés à l'activité d'un site, d'un point de vue opérationnel et managérial (Personne, 1998). L'approche est, dans ce cas, non pas associée à un produit mais à un site. En effet, l'EPE ne prend pas en considération les étapes du cycle de vie du produit hors site mais s'intéresse, en revanche, à des aspects du site non étudié dans le cadre d'une ACV tel que la prise en compte des installations et des procédés.

L'EPE est définie par la norme ISO 14031 (AFNOR, 2000^a) comme "processus visant à appuyer les décisions de la direction pour appréhender le niveau de la performance environnementale d'un organisme et à identifier les points éventuels à améliorer". Cet outil de management, tel que décrit dans cette norme, se conforme à un modèle de management du type "Planification, Mise en œuvre, Contrôle et action" et s'inscrit dans un cycle d'améliorations continues. (Fig.11)

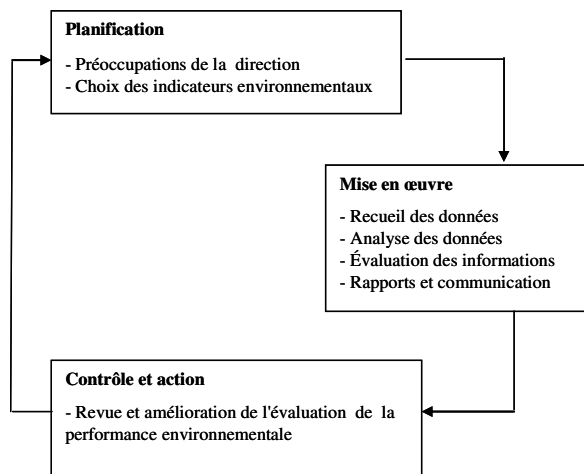


Fig. 11 : Étapes de l'Évaluation des Performances Environnementales selon AFNOR, 2000^d

III.1.1.1- l'étape de planification

Cette première étape s'appuie sur l'identification, par la direction de l'entreprise, de tous les domaines pour lesquels il existe des préoccupations environnementales : activités, produits ou services, stratégie et politiques, exigences réglementaires... Les moyens financiers, physiques et humains doivent être également définis au cours de cette étape. L'engagement de la direction de l'organisme quant à la mise en œuvre de l'EPE est donc essentiel. Il convient, en effet, qu'un organisme planifie l'EPE conjointement aux critères de performances qu'il s'est fixé.

III.1.1.2- l'étape de mise en œuvre

Cette phase est primordiale dans la mise en œuvre d'un système de management environnemental. En effet, l'acquisition de données est essentielle pour fournir des éléments de détermination des indicateurs sélectionnés pour l'EPE. La qualité de ces données est fonction de nombreux facteurs tels que leur disponibilité, leur répétabilité scientifique et statistique. Les sources peuvent être aussi nombreuses que diverses (mesures, entretiens et observations, rapports réglementaires, rapports et études scientifiques...). Les informations obtenues par l'analyse de ces données, exprimées sous forme d'indicateurs, vont ensuite être comparées avec les critères de performance établis au cours de la phase de planification. Cette comparaison va permettre de connaître les exigences environnementales qui sont atteintes ou non et surtout de comprendre, le cas échéant, les raisons pour lesquelles certaines ne le sont pas. Ces exigences sont classiquement les suivantes (Personne et Brodhag, 1998) :

- les consommations d'eau (origine, quantité et qualité des rejets),
- les consommations en énergie (nature),
- les matières premières,
- les rejets atmosphériques,
- les déchets (quantité par type de déchets et filière de traitement associée)
- les nuisances (bruit, vibrations, odeurs, poussières et intégration paysagère)

III.1.1.3- L'étape de contrôle et action

Il paraît important et indispensable que l'entreprise prenne en considération les résultats de son EPE afin d'identifier les différentes possibilités d'amélioration environnementale du site considéré. De plus, pour être efficace, un organisme doit renvoyer son EPE et bien sûr ses résultats de manière périodique afin d'identifier d'autres possibilités d'amélioration.

III.1.2- L'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

L'ACV est une méthodologie déjà éprouvée (SETAC, 1993) qui peut être utilisée pour l'évaluation des impacts environnementaux d'un système c'est à dire de l'ensemble des opérations se rapportant à un produit, un procédé ou une activité (Kusko et Franklin, 1998). C'est l'une des méthodes employée dans l'industrie pour intégrer la problématique environnementale dans la conception des produits. Sa portée permet d'étudier les aspects environnementaux et les impacts potentiels tout au long de la vie d'un produit (du berceau à la tombe), de l'acquisition de la matière première et de sa transformation, de l'utilisation du produit et de sa mise au rebut (AFNOR, 1997^b). En effet, il est essentiel de prendre conscience que tout produit interagit avec son environnement à toutes les étapes de sa vie (Lescuyer, 2004) :

- lors de sa conception, par le choix de matière, de procédés, de concepts,
- lors de sa fabrication par l'énergie, les matières consommées et les rejets émis,
- lors de sa distribution par les moyens de transport utilisés,
- lors de son utilisation par l'énergie et les matières consommées,
- lors de son élimination en fin de vie par les déchets qu'il génère, par l'énergie et les matières consommées pour son traitement et par l'émission de rejets associée à ce traitement.

Il est donc important d'appréhender le problème dans sa globalité. L'Analyse Cycle de Vie (ACV) répond bien à ces perspectives. Le cadre méthodologique de l'ACV a été normalisé entre 1997 et 2000 par la série de norme ISO 14040 à 14043 (AFNOR, 1997^b, 1998, 2000^c et 2000^d). Selon ces normes, la méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie s'articule en quatre grandes étapes que sont : la définition des objectifs de l'analyse, l'inventaire du cycle de vie, l'analyse des impacts et l'interprétation (Rousseaux, 2005) (Fig.12).

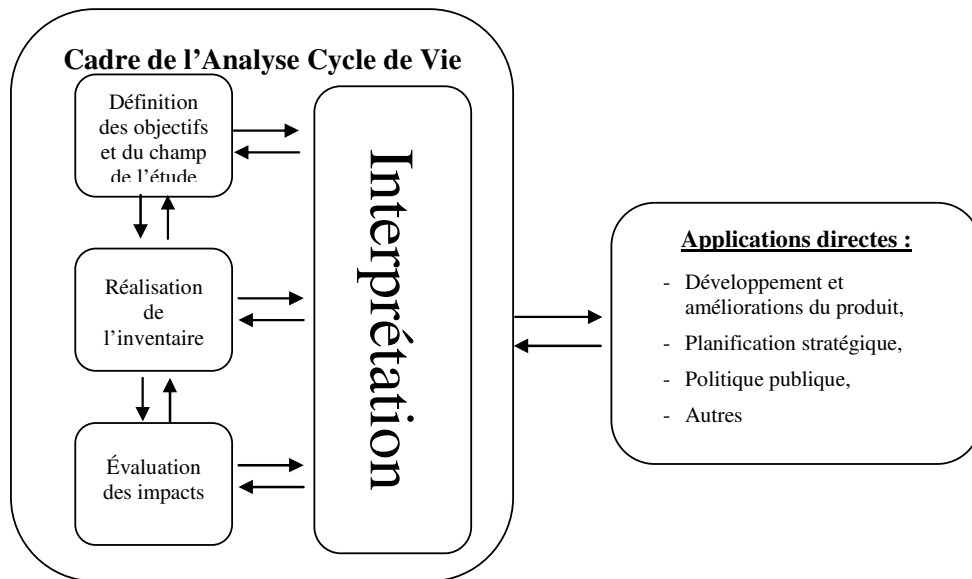


Fig. 12 : Phases de l'ACV d'après série de normes ISO 14040 et suivantes

III.1.2.1- la définition des objectifs

Au cours de cette première phase d'analyse, le but, les frontières du système considéré, les hypothèses de travail ainsi que les utilisations envisagées des résultats de l'étude sont successivement définis (Kusko et Franklin, 1998). Cette première étape apparaît donc primordiale dans la réalisation d'une ACV puisqu'elle permet notamment de cerner le problème posé et envisage les applications de l'analyse. Un concept important complète la définition du champ de l'étude ; il s'agit de l'unité fonctionnelle, c'est à dire l'unité qui définit la fonction du système. Elle est la référence à laquelle sont rapportées les quantités mentionnées dans l'inventaire (AFNOR, 1997^b).

III.1.2.2- la réalisation de l'inventaire du cycle de vie (ICV)

L'inventaire proprement dit est un bilan matière-énergie du système de produits tel qu'il a été défini lors de la première étape (Benetto, 2005). Ainsi, il est facile d'imaginer que l'ACV doit être basée sur un nombre très important de données. L'inventaire va servir à la quantification des différents flux (échanges) de matière et d'énergie, entrants et sortants du système défini, délimité par ses frontières (Fig.13). Ces flux sont répertoriés et classés la plupart du temps selon cinq facteurs d'impact en l'occurrence les consommations de matières premières et d'énergies, les rejets atmosphériques et aqueux et les déchets solides et/ou liquides (Butel-Bellini et Janin, 1999). Les données nécessaires peuvent être obtenues par mesure directe, calcul, estimation ou bien encore par recherche bibliographique ; la crédibilité des résultats d'une ACV reposant en grande partie sur la qualité des données de l'inventaire (AFNOR, 1998). Or, actuellement les praticiens des ACV ne disposent d'aucun référentiel méthodologique pour qualifier la fiabilité de ces données. En effet, c'est une action encore peu systématique au niveau de la pratique actuelle des ACV, en raison de sa grande difficulté car les informations nécessaires à cette quantification sont le plus souvent incomplètes, manquantes voire inexistantes (Blanc et Labouze, 1999).

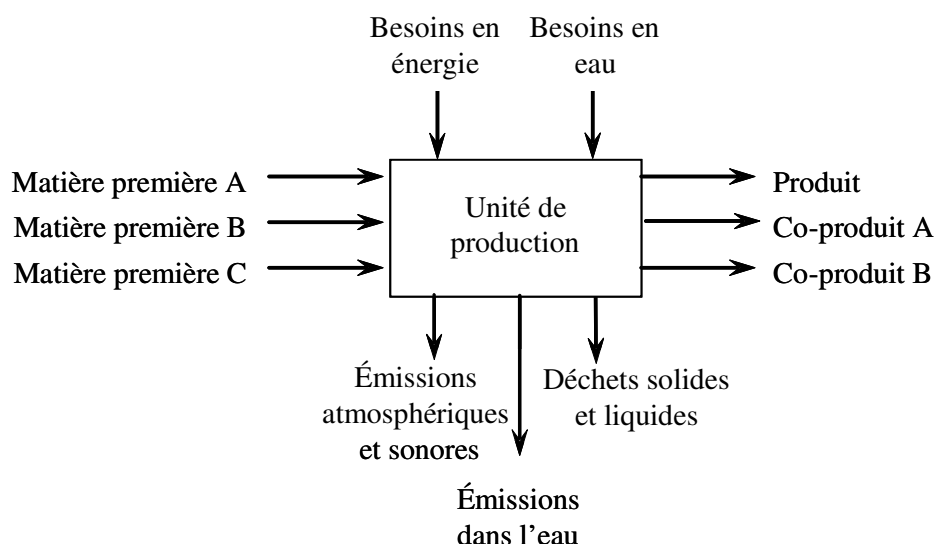


Fig. 13 : Schéma élémentaire des flux entrants et sortants d'une unité de production d'après AFNOR 2000^b

- **Emissions vers l'atmosphère**

On rappelle ci-après les effets physico-chimiques des rejets pouvant être pris en compte dans un ICV.

- **Le dioxyde de carbone (CO₂)** est un gaz incolore et inodore et en lui-même non toxique. Les émissions de CO₂ peuvent d'être d'origine naturelle mais surtout d'origine anthropique (essentiellement émis par combustion des énergies fossiles et les activités industrielles). Le CO₂ est le principal gaz à effet de serre et de ce fait, il contribue fortement au réchauffement climatique. Ceci a motivé l'engagement de la plupart des pays du monde à maîtriser leur émission de CO₂ (protocole de Kyoto adopté en 1997). Par ailleurs, en plus des changements climatiques, l'augmentation des émissions de CO₂ est à l'origine de phénomènes d'acidification des océans qui perturbent la faune sous-marine. L'importance attribuée au CO₂ provient de l'accroissement rapide de sa concentration dans l'atmosphère par suite d'une augmentation de la consommation d'énergie fossile et d'une diminution importante des couverts forestiers à l'échelle mondiale. La concentration en CO₂ a augmenté de 30% depuis l'ère préindustrielle. En effet, elle est passée de 280 ppmv en 1750 à 367 ppmv en 1999 (Deneux, 2002),

- **Le monoxyde de carbone (CO)** se forme lorsque la combustion de matières organiques (gaz, charbon, fioul ou bois, carburants) est incomplète, par suite d'une insuffisance d'oxygène. La source principale de monoxyde de carbone est le trafic automobile. Il est le polluant toxique le plus abondant dans les gaz d'échappement des véhicules automobiles. D'un point de vue environnemental, il participe à la formation de l'ozone troposphérique (près de la terre). Dans l'atmosphère, dès que l'on s'éloigne de la source, il se dilue et se transforme en dioxyde de carbone (CO₂) pour ainsi contribuer à l'effet de serre,

- **Les Composés Organiques Volatils (COV)** constituent une famille de polluants d'une forte diversité et d'une grande complexité. Leur caractéristique commune vient du fait qu'ils sont toujours composés de l'élément carbone et d'autres éléments tels que l'hydrogène, les halogènes, l'oxygène, le soufre... Leur volatilité leur confère l'aptitude de se propager plus ou moins loin de leur lieu d'émission, entraînant ainsi des impacts directs et indirects sur les animaux et la nature.

A titre d'exemple, voici quelques COV bien connus : le butane, le propane, l'éthanol (alcool à 90°), l'acétone, les solvants dans les peintures, les solvants dans les encres...Tous ces composés sont classiquement regroupés sous l'appellation de COVNM ou Composés Organiques Volatils Non Méthanique. En effet, le méthane (CH_4) occupe une place à part parmi les COV car il participe directement au phénomène d'accroissement de l'effet de serre,

- **Le dioxyde de soufre (SO_2)** ou anhydride sulfureux est principalement formé lors de la combustion de combustibles fossiles par combinaison du soufre entrant dans leur composition et de l'oxygène de l'air. Le SO_2 peut, sous l'action du rayonnement solaire, se transformer par oxydation en anhydride sulfurique (SO_3) puis, en présence de l'eau, en acide sulfurique (H_2SO_4). Ces propriétés lui confèrent une participation importante dans le phénomène des pluies acides. Ce gaz irritant agit en synergie avec d'autres substances, notamment les particules en suspension. Il provoque des irritations oculaires, cutanées et respiratoires voir des maladies respiratoire et cardio-vasculaire en cas d'exposition à des concentrations très élevées. Il contribue également à la dégradation de la pierre et des matériaux de nombreux monuments,

- **Les oxydes d'azote ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$)** sont émis lors des phénomènes de combustion ; la source principale étant les véhicules avec près de 60% des émissions. Le dioxyde d'azote est reconnu pour son impact sur la santé, et notamment sur les voies respiratoires. Mais ces effets sur la faune ou la flore ne sont pas clairement identifiés. Les oxydes d'azote interviennent également dans la formation d'ozone. Ils participent aux phénomènes des pluies acides, à la formation de l'ozone troposphérique, dont ils sont l'un des précurseurs, à l'atteinte de la couche d'ozone stratosphérique et à l'effet de serre,

- **Les particules solides (PM)** désignent la fraction des composants en suspension dans le milieu gazeux. Elles peuvent être d'origine naturelle (érosion des sols, pollens ...) ou anthropique. Dans ce cas, elles sont issues majoritairement de la combustion incomplète des combustibles fossiles Les particules sont classiquement différenciées en fonction de leur granulométrie : PM_{10} ($\varnothing < 10\mu\text{m}$), $\text{PM}_{2,5}$ ($\varnothing < 2,5\mu\text{m}$) et $\text{PM}_{1,0}$ ($\varnothing < 1\mu\text{m}$). Plus une particule est fine, plus sa toxicité potentielle est élevée. Les plus grosses (PM_{10}) sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus fines ($\text{PM}_{2,5}$) pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire où elles peuvent provoquer une inflammation et altérer la fonction respiratoire dans son ensemble. Les particules ultrafines sont suspectées de provoquer également des effets cardio-vasculaires. Certaines particules ont des propriétés mutagènes et cancérogènes : c'est notamment le cas de certaines particules émises par les moteurs diesel qui véhiculent certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les effets de salissures des bâtiments et des monuments sont les atteintes à l'environnement les plus évidentes,

- **L'ammoniac (NH_3)** est le principal contributeur aux phénomènes d'acidification des eaux et des sols et d'eutrophisation des milieux aquatiques. Il peut par ailleurs provoquer une irritation des muqueuses des yeux, de la trachée et des bronches.

- **Le protoxyde d'azote (N_2O)**, Bien que traditionnellement non inclus dans les NO_x au niveau des inventaires de rejet, le N_2O ou protoxyde d'azote est un composé oxygéné de l'azote. Le protoxyde d'azote N_2O est un puissant gaz à effet de serre ayant un pouvoir de réchauffement global (GWP) sur 100 ans 310 fois plus élevé qu'une masse équivalente de dioxyde de carbone CO_2 ,

- **Les Polluants Organiques Persistants (POP)** Parmi lesquels, on distingue les dioxines et furanes provenant des incinérateurs de déchets et de la production d'agglomérés pour les hauts fourneaux, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) issus du résidentiel, et les polychlorobiphényles (PCB) produits par la transformation énergétique,

- **L'azote (N₂) et l'oxygène (O₂)** sont les deux principaux éléments constitutifs de l'atmosphère terrestre, respectivement 78 et 21 %, et ne peuvent donc pas être considérés comme des polluants,

- **Les métaux lourds** sont présents à l'état de traces dans les combustibles. Ils sont de natures très diverses. Les émissions de plomb ont fortement diminué du fait de sa disparition dans l'essence depuis 2000. L'industrie manufacturière et la transformation énergétique sont les principaux émetteurs de zinc, de mercure, d'arsenic, de cadmium, de nickel et de sélénium. Le chrome provient principalement du secteur résidentiel et le cuivre du transport routier. Les métaux lourds ont des effets différents potentiellement toxiques selon l'espèce et la forme considérée sur les organismes vivants,

- **L'hydrogène (H₂)** est un gaz incolore et inodore qui en se combinant avec l'oxygène va libérer de l'eau et de la chaleur. Par ailleurs, les molécules de H₂ peuvent, sous certaines conditions, présenter des risques d'inflammabilité et d'explosivité,

- **L'eau (H₂O)**, sous la forme de vapeur, correspond au premier gaz à effet dans l'atmosphère. Cependant, les quantités de vapeur d'eau émises par les activités anthropiques n'ont que des effets très locaux (formation de brouillards, nuages bas) car le temps de résidence de cette molécule ne dépasse pas la dizaine de jours. De plus, au regard des quantités rejetées naturellement par le phénomène d'évaporation, notamment au niveau des océans, l'eau ne peut et n'est pas considérée comme un polluant dans ce travail de thèse.

• *Émissions sonores*

Un son est défini comme un phénomène vibratoire provoqué par des variations rapides de la pression du milieu dans lequel il se propage, pour ce qui nous concerne l'air. Le son produit par une source va se propager dans le temps et dans l'espace avec une célérité c , dépendant du milieu de propagation (dans l'air, $c = 345 \text{ m.s}^{-1}$ à 25°C). Un son va être considéré comme pur lorsqu'il est produit par une onde sinusoïdale. Ces phénomènes vibratoires sont caractérisés par leur fréquence, leur période et leur intensité. La plupart des bruits environnementaux se composent d'un mélange complexe de sons de fréquences différentes. Un bruit ne peut être caractérisé que par son spectre acoustique (Cabarat, 1960). La pression sonore s'exprime en pascals. L'oreille humaine perçoit des sons à partir de 20 micropascals (seuil d'audibilité) et jusqu'à 20 pascals (seuil de la douleur). Cette unité, le pascal, n'est pas idéale, puisqu'il existe un facteur de 1 000 000 entre les sons les plus faibles et les sons les plus élevés qui peuvent être perçus par l'oreille humaine. Pour plus de facilité, on utilise le décibel (dB), qui permet de réduire cette gamme entre 0 (seuil d'audibilité) et 120 (seuil de la douleur). Ainsi, pour exprimer quantitativement un bruit, on utilise une loi logarithmique, intégrant une valeur de référence arbitraire.

Par définition, le niveau d'intensité acoustique s'exprime par la formule suivante :

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I_I}{I_0} \quad (1)$$

avec : L_I , niveau d'intensité acoustique du bruit considéré (dB) ; I_I , intensité acoustique du bruit (W.m^{-2}) ; I_0 , intensité acoustique de référence correspondant, en principe, à la plus petite intensité audible. Cette intensité de référence est de $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.

De la même manière, le niveau de puissance acoustique, noté L_W (dB), peut être déterminé à partir de la formule suivante :

$$L_W = 10 \log \frac{W_1}{W_0} \quad (2)$$

avec : W_1 , puissance acoustique du bruit (W) qui est fonction de son intensité et W_0 , puissance acoustique de référence égale à 10^{-12} W.

Dans ces conditions d'ondes progressives planes, et dans l'air, l'intensité est proportionnelle au carré de la pression. Il s'ensuit une définition particulière de la pression acoustique :

$$L_p = 10 \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2 \quad (3)$$

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{P_1}{P_0} \quad (4)$$

avec : L_p , niveau de pression acoustique (dB) ; P_1 , pression acoustique du bruit mesuré ; P_0 , pression de référence ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa).

Dans le cas où plusieurs sources de bruit coexistent et puisque l'échelle en dB est logarithmique, le niveau global atteint peut être déterminé grâce à la formule suivante :

$$L_{p(Total)} = 10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{p_i}}{10}} \right) \quad (5)$$

De ce fait, un doublement de la pression acoustique équivaut uniquement à une augmentation de 3 dB. Ainsi, deux sources de 60 décibels chacune vont, ensemble, émettre un son équivalent à 63 décibels. De la même manière, si deux niveaux de bruit sont émis simultanément par deux sources sonores, et si l'une est au moins supérieure de 10 dB par rapport à l'autre, le niveau sonore résultant est égal au plus grand des deux : ce phénomène est appelé l'effet de masque.

Par ailleurs, il faut aussi prendre en compte la composition du bruit, étant donné que la plupart des individus perçoivent les sons hautes fréquences comme plus forts que ceux de basses fréquences de même énergie. L'oreille répond aux fréquences de manière non linéaire : certaines tonalités sont plus facilement perçues que d'autres. C'est la raison pour laquelle, dans le calcul du niveau sonore, la mesure la plus utilisée est le décibel (A) ou dB(A) qui module les phénomènes physiques en donnant moins de « poids » aux basses fréquences qu'aux hautes fréquences (Mouret et Vallet, 1998). La courbe de pondération « A » (Fig.14) correspond au filtre représentatif de l'oreille humaine.

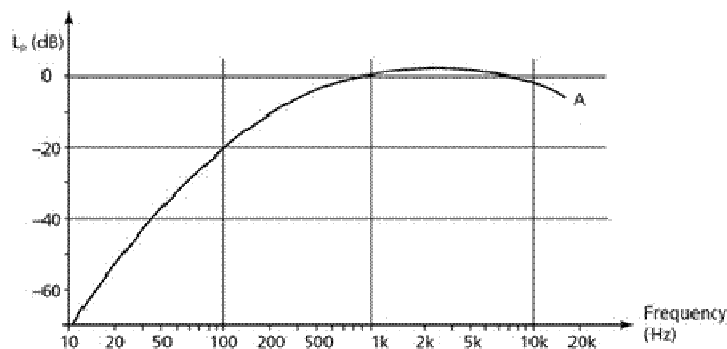


Fig. 14 : Courbe de pondération A

L'énergie d'un son est proportionnelle à son niveau mais aussi à sa durée. Ainsi, un bruit impulsif de fort niveau (130 dB(A)) peut être toléré sans dommage s'il n'est pas répétitif tandis que l'exposition prolongée à des niveaux dépassant 85 dB(A) met en danger l'audition. De ce fait, il apparaît que le cumul d'énergie sonore reçue par un individu soit l'indicateur le plus représentatif des effets du bruit sur l'homme. Ce cumul est traduit par le niveau énergétique équivalent noté LAeq (Fig.15) qui représente donc le niveau sonore continu qui produirait la même énergie, pendant un temps Δt ($t_2 - t_1$), que le niveau sonore auquel serait soumis un individu (6).

$$LAeq(t_2 - t_1) = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2(t)} dt \right] \quad (6)$$

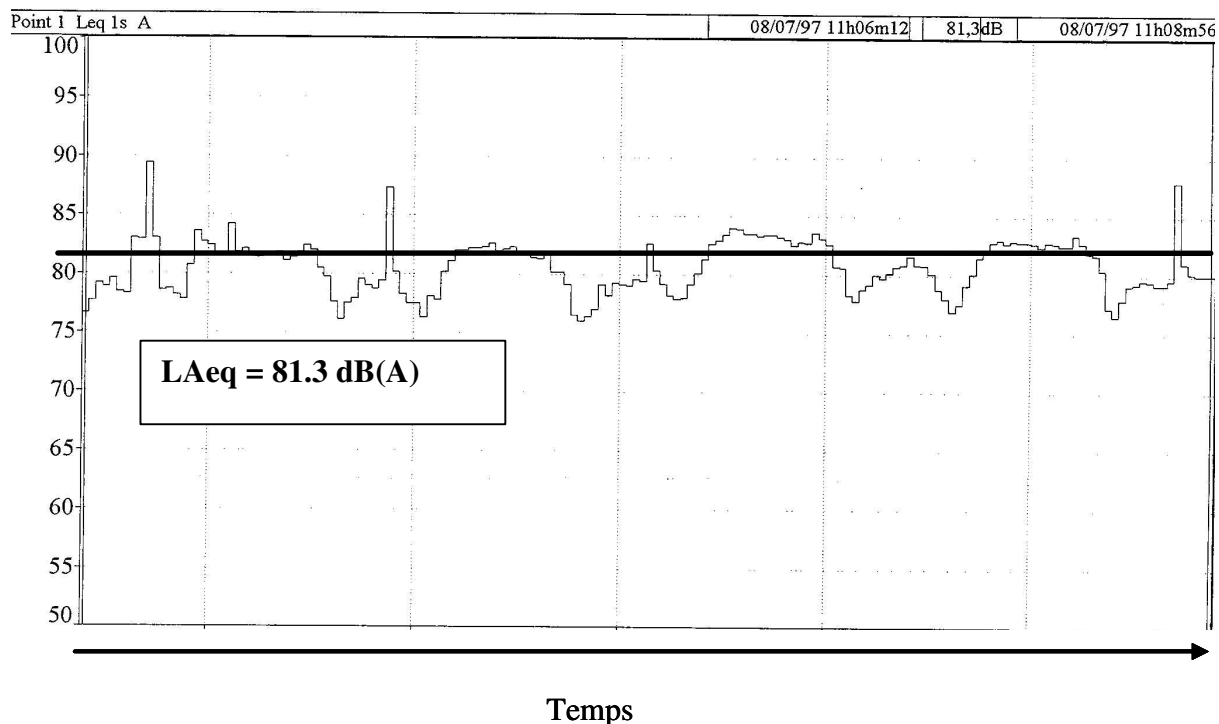


Fig. 15 : Exemple de variation du niveau sonore d'un engin (pelle hydraulique de 96 kW) et du LAeq équivalent (Source : LCPC)

III.1.2.3- l'évaluation des impacts environnementaux

La troisième phase de l'ACV consiste à évaluer la portée des impacts potentiels (positifs ou négatifs) sur l'environnement en utilisant les résultats de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie. Cette étape est généralement réalisée en trois parties (Rousseaux, 1998) : la classification des impacts, la caractérisation des impacts et l'évolution globale des impacts. Cette évaluation nécessite de choisir des indicateurs pertinents (les indicateurs d'impacts) pour passer d'une quantité de rejet dans le milieu (par exemple émissions atmosphériques) à l'intensité de l'effet que le rejet aura sur le milieu. Certaines matières rejetées en quantité importante pourront avoir un effet limité sur l'environnement alors que d'autres produiront des dommages considérables malgré leurs faibles émissions dans le milieu.

Les différentes classes d'impact classiquement prises en compte dans les ACV sont les suivantes (Khalifa, 1999 ; Rousseaux, 1998) :

- l'épuisement des réserves naturelles : énergie, matières, eau et sols,
- l'effet de serre,
- la dégradation de la couche d'ozone,
- la toxicité et l'écotoxicité,
- les altérations physiques des écosystèmes,
- les nuisances : bruit, intégration paysagère, odeurs, vibrations.

III.1.2.4- l'interprétation et la recherche d'améliorations

L'objectif de cette dernière étape est d'identifier et d'évaluer les opportunités de réduction des impacts environnementaux (Ventère, 1997). C'est une phase au cours de laquelle les résultats de l'analyse de l'inventaire ou de l'évaluation des impacts, ou les deux, sont combinés en cohérence avec l'objectif et le champ définis pour l'étude afin d'en dégager des conclusions et des recommandations (Blanc et Labouze, 1999).

III.2- Les indicateurs de développement durable

Le concept d'indicateur a d'abord été utilisé dans un contexte purement scientifique et plus particulièrement dans le domaine de la recherche en sociologie. Il y désignait la traduction de concepts théoriques (abstraits) en variables quantifiables, les indicateurs étant des variables observables utilisées pour rendre compte d'une réalité non observable (Boulanger, 2004). Le présent paragraphe vise à préciser cette idée d'indicateur. Quelques notions permettront tout d'abord de définir ce que sont les indicateurs, leurs fonctions, leur méthode d'élaboration et de conception, leurs portées mais aussi leurs limites. Ensuite quelques exemples d'indicateurs de développement durable seront illustrés.

Selon l'IFEN (IFEN), un indicateur est une donnée qui a été sélectionnée à partir d'un ensemble statistique plus important car elle possède une signification et une représentativité particulière. Par exemple, les émissions nationales de CO₂ constituent un indicateur de la contribution de notre pays à l'effet de serre. Ainsi, les indicateurs condensent l'information, et simplifient l'approche de phénomènes, souvent complexes, ce qui en fait des outils de communication précieux.

L'OCDE (OCDE, 1993) définit un indicateur comme une mesure récapitulative fournissant des informations sur l'état ou l'évolution d'un système. Le plus souvent quantitatifs, les indicateurs peuvent aussi faire intervenir des données qualitatives ; par exemple, le degré de satisfaction de la population (Zaccà et Bauler, à paraître).

Par définition, les indicateurs visent donc à réduire le nombre de composantes nécessaires pour rendre compte d'une condition ou d'une situation. Leur fonction principale est d'être porteur d'information, destinée à être communiquée à une cible. D'un point de vue environnemental et de manière très large et très globale, les indicateurs peuvent être définis comme étant des grandeurs, établies à partir de quantités observables ou calculables, reflétant de diverses façons possibles, les impacts sur l'environnement occasionnés par une activité donnée (Tyteca, 2002).

Suivant le modèle PER (Pression-État-Réponse), développé par l'OCDE, les indicateurs sont classés en trois grandes catégories, en l'occurrence :

- **Indicateurs de pression** qui rendent compte de la pression exercée par les activités humaines sur l'environnement. Ils peuvent être directs (émission de substances polluantes ou consommation de ressources naturelles par exemple) ou indirectes lorsqu'ils se rapportent à une activité humaine entraînant une pression directe,
- **Indicateurs d'état** qui décrivent la situation environnementale, écologique, physique, socioéconomique d'un espace à un instant donné et de son évolution dans le temps (ex : concentration des eaux de rivière en nitrates),
- **Indicateurs de réponse** qui permettent d'évaluer les efforts consentis pour résoudre un problème environnemental (ex : financements destinés à la dépollution des sols). En effet, ils reflètent l'implication de la société à répondre aux préoccupations liées à l'environnement. Les actions et réactions individuelles et collectives sont de plusieurs ordres : atténuer ou éviter les effets négatifs des activités humaines sur l'environnement ; mettre un terme aux dégradations déjà infligées à l'environnement ou chercher à y remédier ; protéger la nature et les ressources naturelles. Les dépenses de protection de l'environnement, les taxes, les subventions, la réglementation en sont des exemples.

Ce modèle (Fig.16) est basé sur le principe de causalité : les activités humaines exercent des pressions sur l'environnement et en modifient donc l'état au travers de la qualité et de la quantité des ressources naturelles. La société répond à ces changements en adoptant des mesures en matière de politique environnementale, économique et sectorielle (réponses de la société). Ces dernières peuvent alors agir sur les comportements / activités humaines et donc rétroactivement sur les pressions qu'ils / elles exercent (OCDE, 1993).

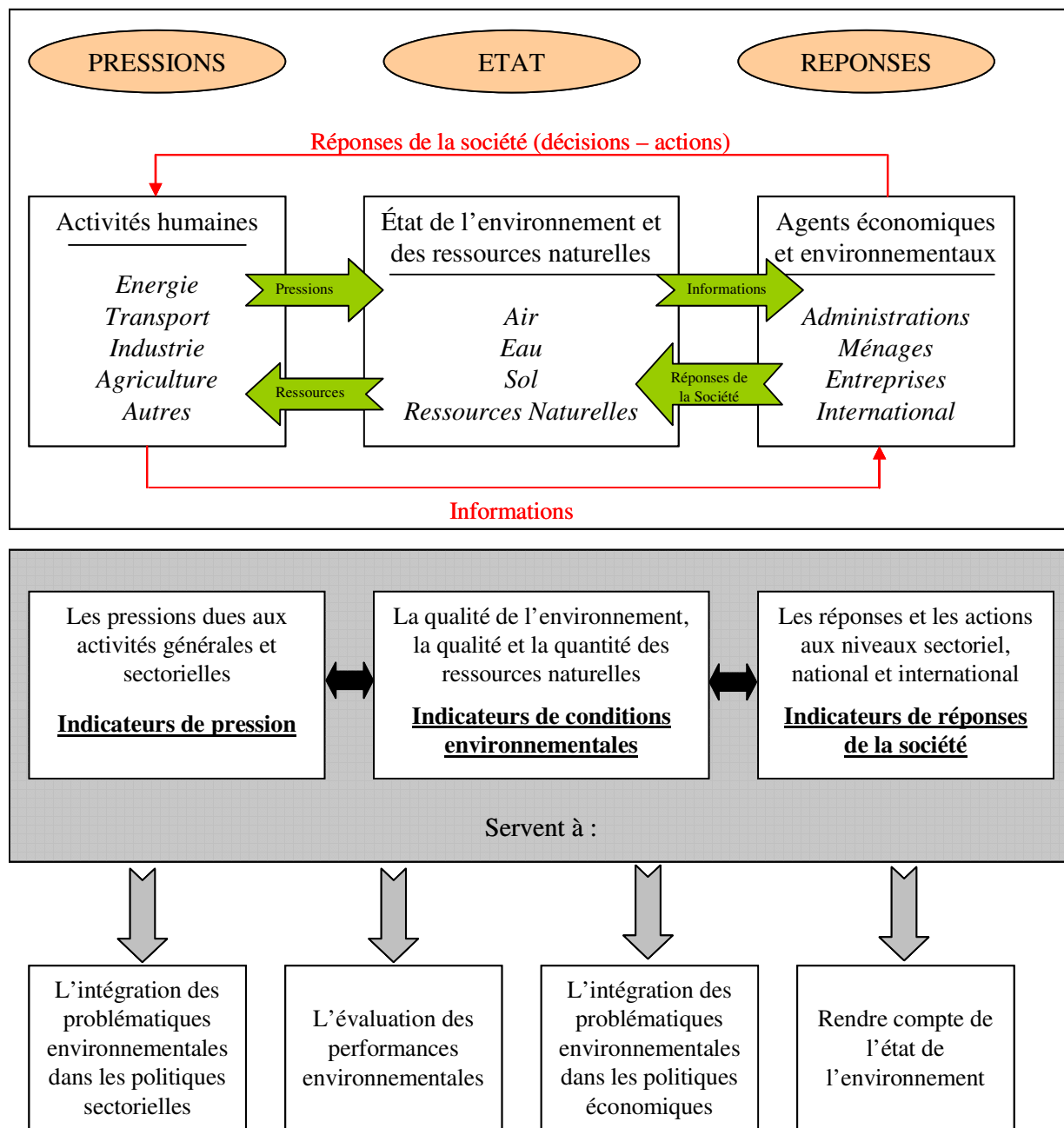


Fig. 16 : Le modèle PER développé par l'OCDE (OCDE, 1993)

L'indice de réchauffement global est un exemple concret d'indicateur de pression. Il se base sur le principe que l'équilibre radiatif naturel à la surface de la terre est déterminé pour une part importante par la présence de gaz qui ont la propriété d'intercepter les rayonnements émis par la Terre, puis de les renvoyer vers l'Univers. Cet équilibre des flux radiatifs est actuellement susceptible d'être déstabilisé dans la mesure où le développement de l'activité humaine provoque une modification de la composition de l'atmosphère, soit en augmentant la concentration de certains gaz préexistants dans l'atmosphère, soit en injectant de nouveaux constituants (Rousseaux, 1998). Cette modification des flux radiatifs (ou forçage radiatif) est identifiée comme une augmentation de l'effet de serre naturel. Les principaux gaz à effet de serre étant le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les organo-halogénés, les fréons (CFC) et leurs substituts, les halons (HCFC), l'ozone (O₃), les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO) et les composés organiques volatils (COV).

La SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) recommande aujourd'hui l'emploi de l'indice de réchauffement global ou Global Warming Potential (GWP) défini par l' Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001). Cet indice caractérise la participation de la molécule considérée à l'effet de serre. Il est calculé pour une durée déterminée (20, 100 ,500 ans...) et par rapport à une molécule de référence (CO₂) à laquelle on attribue un GWP égal à 1. Dans les ACV, on utilise généralement le GWP₁₀₀ (Khalifa, 2002). Ainsi, la contribution à l'effet de serre des substances gazeuses j émises par le sous-système i est alors donnée par la formule (Rousseaux, 1998) :

$$I^i = \sum_j m_j^i \cdot GWP_j = \sum_j m_j^i \cdot \frac{\int_0^T A_j[t] \cdot C_j[t] \cdot dt}{\int_0^T A_{CO_2}[t] \cdot C_{CO_2}[t] \cdot dt} \quad (7)$$

avec : I_i (kg équivalent CO₂), indicateur de la contribution à l'effet de serre du système i ; m_j^i (kg), masse de substance gazeuse j à effet de serre émise par le système i ; GWP_j (adimensionnel), Global Warming Potential de la substance j (Fig.17) ; $A_j [t]$ (W), forçage radiatif instantané dû à une augmentation d'une unité de la concentration du gaz j ; $C_j [t]$ (mg/Nm³), concentration du gaz j restant à t.

Gas		Lifetime (years)	Global Warming Potential (Time Horizon in years)		
			20 yrs	100 yrs	500 yrs
Carbon dioxide	CO ₂		1	1	1
Methane ^a	CH ₄	12.0 ^b	62	23	7
Nitrous oxide	N ₂ O	114 ^b	275	296	156
Hydrofluorocarbons					
HFC-23	CHF ₃	260	9400	12000	10000
HFC-32	CH ₂ F ₂	5.0	1800	550	170
HFC-41	CH ₃ F	2.6	330	97	30
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	29	5900	3400	1100
HFC-134	CHF ₂ CHF ₂	9.6	3200	1100	330
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	13.8	3300	1300	400
HFC-143	CHF ₂ CH ₂ F	3.4	1100	330	100
HFC-143a	CF ₃ CH ₃	52	5500	4300	1600
HFC-152	CH ₃ CF ₂ CH ₃	0.5	140	43	13
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	1.4	410	120	37
HFC-161	CH ₃ CH ₂ F	0.3	40	12	4
HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃	33	5600	3500	1100
HFC-236cb	CH ₂ FCF ₂ CF ₃	13.2	3300	1300	390
HFC-236ea	CHF ₂ CHFCF ₃	10	3600	1200	390
HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	220	7500	9400	7100
HFC-245ca	CH ₂ FCF ₂ CHF ₂	5.9	2100	640	200
HFC-245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	7.2	3000	950	300
HFC-365mfc	CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃	9.9	2600	800	280
HFC-43-10mee	CF ₃ CHFCF ₂ CF ₃	15	3700	1500	470
Fully fluorinated species					
SF ₆		3200	15100	22200	32400
CF ₄		50000	3900	5700	8900
C ₂ F ₆		10000	8000	11900	18000
C ₃ F ₈		2600	5900	8600	12400
C ₄ F ₁₀		2600	5900	8600	12400
c-C ₄ F ₈		3200	6800	10000	14200
C ₅ F ₁₂		4100	6000	8900	13200
C ₆ F ₁₄		3200	6100	9000	13200
Ethers and Halogenated Ethers					
CH ₃ OCH ₃		0.015	1	1	<<1
HFE-125	CF ₃ OCHF ₂	150	12900	14900	9200
HFE-134	CHF ₂ OCHF ₂	26.2	10500	6100	2000
HFE-143a	CH ₃ OCF ₃	4.4	2500	750	230
HCFE-235da2	CF ₃ CHClOCHF ₂	2.6	1100	340	110
HFE-245fa2	CF ₃ CH ₂ OCHF ₂	4.4	1900	570	180
HFE-254cb2	CHF ₂ CF ₂ OCH ₃	0.22	99	30	9
HFE-7100	C ₄ F ₉ OCH ₃	5.0	1300	380	120
HFE-7200	C ₄ F ₉ OC ₂ H ₅	0.77	190	55	17
H-Galden 1040x	CHF ₂ OCF ₂ OC ₂ F ₄ OCHF ₂	6.3	5900	1800	560
HG-10	CHF ₂ OCF ₂ OCHF ₂	12.1	7500	2700	850
HG-01	CHF ₂ OCF ₂ CF ₂ OCHF ₂	6.2	4700	1500	450

Fig. 17 : Le potentiel de réchauffement global (GWP) et les durées de vie dans l'atmosphère des principaux gaz à effet de serre (IPCC, 2001)

IV- Discussion

Le but de ce travail est de proposer une méthode et un outil d'évaluation au sens du développement durable de la production de granulats naturels en carrière, une discussion relative aux méthodes d'évaluation environnementale et aux modalités de choix d'indicateurs est proposée ci-après.

IV.1 – Intérêts et limites des méthodes d'évaluation environnementale

IV.1.1- Méthode EPE

La méthode d'évaluation EPE qui vient d'être illustrée peut être utilisée, à la fois, de façon autonome (en fonction des objectifs que se fixe l'entreprise), en accompagnement de la mise en place d'un Système de Management Environnemental (SME) permettant alors de réaliser la phase d'analyse environnementale mais également en complément d'un SME, offrant alors un outil de collecte, de suivi et d'exploitation des données environnementales.

Vis-à-vis de la poursuite de la démarche environnementale vers l'implantation d'un système de management environnemental, la méthode permet de dégager :

- les avantages acquis (passages obligatoires lors de l'EPE),
- les avantages possibles, dépendant de la valorisation des résultats de l'évaluation avec notamment la définition d'objectifs propres à l'entreprise, la formalisation d'un plan d'action et d'une politique environnementale,
- des aspects qu'il reste à prendre en compte : formalisation de la communication interne, écriture de procédures.

Cependant, l'idée que l'approche d'une situation environnementale soit construite sur des indicateurs induit des limites liées (Personne, 1998) :

- à la construction des indicateurs. En effet, basés sur un choix purement subjectif de la part du chargé de l'étude (et par voie de conséquence de la direction), ils ne peuvent être ni neutres, ni objectifs. De plus, chacun d'entre eux n'est pas en mesure de prendre la totalité des dimensions du site étudié et donc ne véhicule qu'une vision partielle de la réalité,
- au traitement des indicateurs et à la pondération qu'ils peuvent subir en fonction des priorités que s'est fixées l'entreprise.

IV.1.2- Méthodologie ACV

L'ACV est quant à elle, la méthode d'évaluation des impacts la plus reconnue au niveau international. C'est en effet la seule méthode dite approfondie ayant fait l'objet de travaux de normalisation. Le principe essentiel est d'analyser les bilans environnementaux de chaque étape du cycle de vie d'un produit et de s'assurer de la pertinence des recommandations énoncées.

Par ailleurs, le choix de l'unité fonctionnelle est un des paramètres influant sur les résultats de l'ACV. En effet, la relation entre la quantité de production et les impacts pour un produit donné n'est généralement pas linéaire. Ce qui est vrai pour 500 kg de produit ne le sera pas si l'on extrapole en se contentant de doubler les impacts pour une tonne (Blanc, 1999 in Balanec, 2002). De la même manière, l'évaluation des coûts environnementaux d'un produit se traduira différemment selon le site industriel considéré.

Enfin, comment peut-on conclure d'un point de vue environnemental qu'un produit est meilleur qu'un autre si, par exemple, l'un est reconnu pour avoir un impact sur l'effet de serre plus important et le second influant davantage sur l'acidification atmosphérique ? Cela nécessite forcément une pondération des différents impacts ; pondération obligatoirement subjective, donc contestable, basée sur un choix purement personnel s'avérant variable selon le contexte et les objectifs de l'étude.

IV.1.3- Synthèse en vue d'applications à des sites industriels

Dans le cas des carrières, l'évaluation des produits fabriqués (les différentes classes granulaires) est certes dépendante des installations d'extraction et d'élaboration des granulats mais aussi du gisement lui-même qui a une incidence sur l'organisation de la production (implantation des équipements sur le site notamment). D'où la nécessité, à l'issue de cette bibliographie sur les méthodes d'évaluation environnementales, d'intégrer dans une même approche : la nécessité d'évaluer le produit et celle de tenir compte de l'organisation de sa production en relation avec la nature du site. Dans cette optique, le tableau 4 illustre que l'interprétation du cycle de vie peut, le cas échéant, faire la preuve des liens qui existent entre l'ACV et les autres techniques de management environnemental.

*Tableau 4 : Bilan des différentes méthodes normalisées
selon l'objectif recherché et l'objet considéré*

	Approche type	
	Organisme	Produit
Mise en œuvre d'une politique environnementale	Système de management environnemental (ISO 14004 et 14061)	Prise en compte de l'environnement en conception (XP ISO/TR 14062)
Démonstration	ISO 14001	Étiquage environnemental (ISO 14020)
Outils d'évaluation	Audit environnemental (série ISO 14010)	ACV (série ISO 14040)
	Évaluation des performances environnementales (série ISO 14030)	
Terminologie	Termes et définitions (ISO 14050)	

Nombre d'entreprises s'intéressent aujourd'hui à ces approches approfondies et surtout intégrées pour analyser puis optimiser leur produit et leur processus de production d'un point de vue environnemental. Cependant les études complètes type ACV demeurent trop lourdes (beaucoup d'informations à réunir et de calculs à effectuer) donc trop coûteuses en ressources financières, humaines et temporelles (Schneider *et al.*, 1998) pour qu'elles soient accessibles aux entreprises de petites envergures (PME/PMI). C'est la raison principale pour laquelle les industriels désireux de connaître et de réduire les impacts environnementaux de leur produits vont préférer à cette approche complète et très détaillée, une approche simplifiée leur permettant de dégager les points faibles du produit et ainsi d'identifier les étapes les plus importantes à améliorer au regard des différents aspects environnementaux.

IV.2- Mise en place, portée et limites d'indicateurs

IV.2.1- Mise en place

L'ouvrage "indicateurs et tableaux de bord" (CERUTTI 92 in Personne, 1998), édité par l'Afnor, propose une méthode de construction des indicateurs, qui s'attache au suivi des différentes étapes permettant d'arriver à la définition finale d'un indicateur, en l'occurrence :

- **Définition du champ de mesure**, c'est à dire du domaine auquel on s'intéresse et sur lequel va porter la mesure,
- **Choix des objectifs**, on décrit le but que l'on cherche à atteindre dans le champ précédemment défini,
- **Identification des variables**, on recherche à ce stade les éléments qu'il est nécessaire de suivre pour se situer par rapport aux objectifs,
- **Choix des paramètres mesurables**, les variables ainsi identifiées doivent être traduites par des paramètres mesurables, qui peuvent être nombreux et parmi lesquels il est nécessaire de faire un tri selon l'importance du paramètre ou son accessibilité,

- **Sélection des indicateurs**, une fois cette sélection des paramètres menée à bien, il est nécessaire de les transcrire en données quantifiables, et éventuellement de les combiner pour obtenir un indicateur global. On obtient ainsi un corps d'indicateurs, censés être représentatifs du domaine ou du phénomène que l'on veut observer ou suivre.
- **Validation des indicateurs sélectionnés**, avant la mise en œuvre, il est préférable de vérifier leur cohérence et leur pertinence.
- **Elaboration du tableau de bord**, on dispose finalement d'un ensemble d'indicateurs, a priori pertinents. Pour en faire un véritable outil de communication, il est nécessaire de les organiser dans une présentation offrant une bonne visualisation des résultats. Il peut présenter les différents indicateurs sous forme de graphiques, par exemple en camembert, en courbe xy, en araignée.

IV.2.2- La portée et les limites des indicateurs

Un indicateur doit être une information simple (facilement compréhensible) qui peut-être quantifiée de manière claire, reproductible, rapide et doit synthétiser des phénomènes complexes à différentes échelles. La qualité majeure d'un indicateur apparaît donc être sa capacité à rendre compte de façon concise de phénomènes complexes. En effet, si les informations sont trop abondantes, elles risquent de nuire à la compréhension des phénomènes et d'entraver la décision : « trop d'informations tuent l'information !!! ». Ainsi en agrégeant des données multiples et d'origines diverses, les indicateurs quantifient et synthétisent l'information. Des phénomènes souvent complexes, deviennent ainsi "visibles", ce qui permet de les suivre dans le temps, et d'agir en conséquence. La figure suivante (Fig.18) illustre l'ensemble des qualités qu'un indicateur doit respecter.

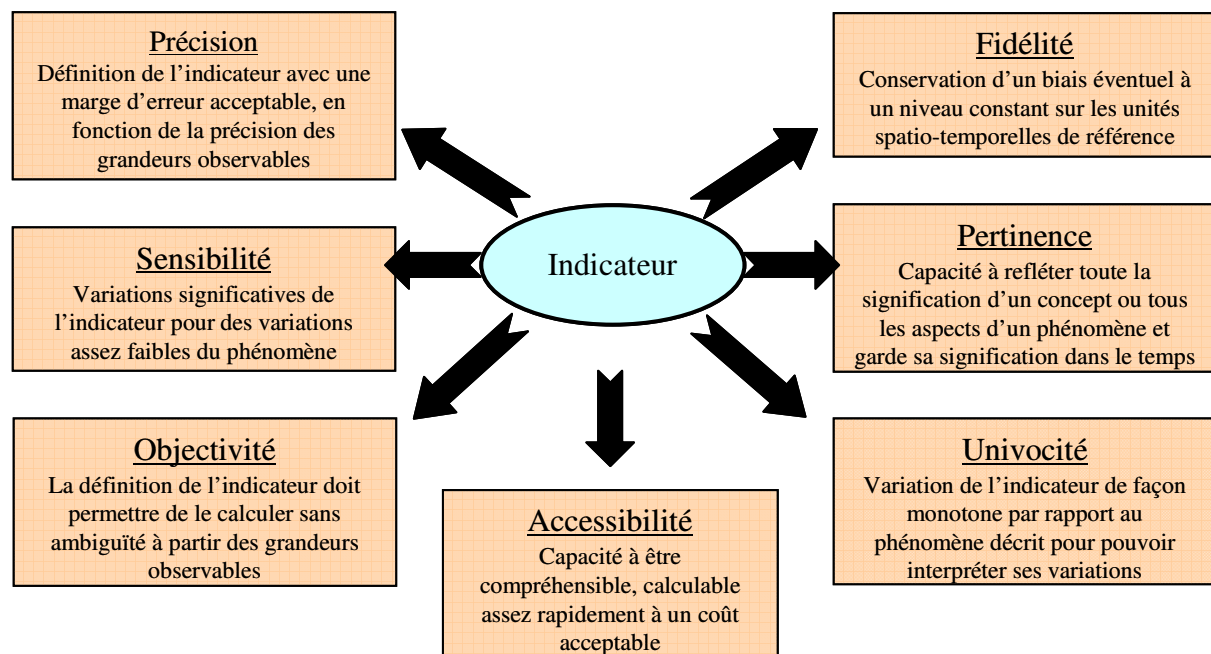


Fig. 18 : Les qualités d'un indicateur (Institut, 2001)

Cependant, dans l'élaboration d'un système d'indicateurs, le choix du nombre d'indicateurs et de leur éventuelle agrégation est une question importante qui renvoie plus particulièrement au mode de restitution de l'information (Madec, 2003).

En effet, si chaque niveau d'agrégation facilite la lisibilité et permet de gagner en clarté en dégageant une information qui n'apparaissait pas dans les données non agrégées, il entraîne quasi systématiquement une perte d'information (Personne et Brodhag, 1998). A titre d'exemple, la consommation énergétique d'un site peut être obtenue par agrégation des différents types d'énergies consommées (électricité, fuel, ...) ramenés en unité commune telle que le kWh ou TEP. Dans ce cas, la perte d'information correspondra à la part respective de chaque type de consommations. Un indicateur ne représente toujours qu'un modèle de la réalité et non pas la réalité elle-même (Madec, 2003) ; c'est pourquoi il doit être accompagné d'informations qualitatives et de commentaires. En effet, les indicateurs ne peuvent remplacer les données et informations plus détaillées et ne doivent donc être utilisés que pour fixer des points de repères et des orientations (Risse et Waaub, 1999).

De la même manière, lorsqu'on l'on souhaite évalué une situation globale, on doit en général prendre en compte plusieurs types d'impacts portant sur des domaines très différents les uns des autres (pollution de l'air, consommation énergétique, nuisances, ...) qu'il faut pondérer (Boulanger, 2004). Or, sur quelle base décider et selon quelle procédure évaluer ces coefficients à appliquer. L'estimation des coefficients de pondération peut considérer deux types de facteurs (Personne et Brodhag, 1998) :

- **facteurs objectifs** tels que l'échelle spatiale (locale, régionale, mondiale), l'échelle temporelle, le taux de conséquence (réversible ou irréversible), ... Les limites de ces aspects sont dues aux mécanismes des impacts ;

- **facteurs subjectifs** dépendant en grande partie de la personne qui juge et de sa conception du développement durable. Par exemple, un industriel accordera plus d'importance aux consommations énergétiques (car reliées à des coûts directs) alors qu'un militant pour la protection de la nature allouera un facteur plus élevé pour la perte de biodiversité. Les coefficients de pondération étant totalement différents en fonction de la personne à la quelle on s'adresse, les indicateurs fourniront des résultats divergents voir opposés. A titre d'exemple, deux indicateurs (Environmental Sustainability Index et Environmental Human Development Index) rendus publiques quasi-simultanément au cours du premier semestre 2001 visent, tous les 2, à classer, sous forme d'un indice global, les nations en fonction de leurs performances en matière de développement durable (Tableau 5).

Tableau 5 : Résultats des indicateurs de développement durable ESI et E-HDI (Boutaud, 2005)

	ESI	E-HDI
Norvège	1	16
Finlande	2	17
Canada	3	6
Islande	4	20
Suède	5	12
Suisse	6	2
Australie	7	10
Danemark	8	19
Etats-Unis	9	14
Pays-Bas	10	18
...		
Algérie	11	11
Singapour	12	15
Sénégal	13	13
Malawi	14	9
Vietnam	15	3
Iran	16	4
Nigéria	17	7
Ouganda	18	1
Bangladesh	19	8
Madagascar	20	5

Ce tableau illustre très clairement les problèmes que peuvent générer l'utilisation d'indice global et donc pouvant être basé sur des données différentes ayant été agrégées puis pondérées. Bien que l'objectif soit le même, les résultats présentent d'énormes divergences entre eux. Ainsi, la Norvège sera classée en première position pour l'ESI alors que, pour l'E-HDI, elle ne situe qu'à la 16^{ème} place. Ces divergences d'opinion illustrent et/ou démontrent parfaitement des perceptions complètement opposées de la notion de développement durable ; perceptions qui se trouvent correspondre aux approches technico-économistes pour l'ESI et écologiques pour l'E-HDI (Boutaud, 2005).

Globalement, on doit retenir l'idée que l'approche d'une situation par les indicateurs connaît des limites liées :

- **à la construction des indicateurs eux-mêmes.** Ni neutres, ni objectifs, dans la mesure, les indicateurs correspondent à une lecture particulière du réel car ne peuvent pas prendre en compte la totalité des dimensions du domaine étudié, et ne peuvent véhiculer qu'une vision partielle de la réalité (Bouni, 1998),
- **au fait que les indicateurs sont marqués d'un fort pragmatisme,** compte tenu de l'insuffisance de données disponibles et/ou des difficultés rencontrés à obtenir ces données (Bouni, 1998),
- **au traitement d'agrégation / pondération qu'ils subissent :** l'introduction implicite de facteurs subjectifs est un biais susceptible de fausser l'utilisation des indicateurs en tant qu'élément d'aide à la décision (Personne, 1998).

V- Conclusion

La prise de conscience de l'importance de la protection de l'environnement et des impacts potentiels associés à l'élaboration des matériaux de construction nécessite le développement de méthodes destinées à mieux comprendre et à réduire les impacts engendrés lors de la production de cette ressource. La mise au point d'indicateurs pertinents d'un point de vue scientifique, adaptables et évolutifs d'un point de vue temporel, est un enjeu essentiel afin de pouvoir mesurer et contrôler l'état d'avancement vers une gestion durable de la ressource en granulats naturels. Parallèlement, pour répondre aux nouveaux enjeux environnementaux, les entreprises ont besoin de maîtriser les effets de leurs activités ou produits sur l'environnement et donc de les évaluer (Personne et Brodhag, 1998). Dans ce contexte, le présent travail ne peut pas être considéré comme une Analyse Cycle de Vie (AFNOR, 1997^b) proprement dite car si les produits élaborés en carrière se présentent sous forme de classes granulaires standard, leur évaluation environnementale est complètement liée au type de gisement et à l'organisation de l'exploitation. Ainsi, à l'issue de la bibliographie rassemblée il a paru essentiel de développer un outil et une approche spécifique à la nature de sites de carrières considérés ; cet outil se situe plutôt au « carrefour » entre une ACV et une EPE (AFNOR, 2000^a). Pour ce faire, un certain nombre d'informations et de données relatives à des exploitations de carrières sont apparues comme nécessaires : la démarche adoptée à cette fin dans le cadre de la thèse est présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II -
Études de sites de production en carrière
sur le territoire français

I- Introduction

La littérature internationale ne mentionnant pas d'approche environnementale qui étudie séparément les fractions granulométriques produites, ce point particulier a été pris en considération de façon prioritaire. Par conséquent, l'affectation de l'énergie à chacune des classes granulaires produites au sein d'une installation de traitement et d'élaboration des matériaux a été abordée tout particulièrement. Par la suite, la problématique de l'étude de la production de granulats en carrière a été posée de manière beaucoup plus large en prenant en compte, à la fois, la nature de la roche et les modalités d'exploitation qui incluent le choix des matériels utilisés, l'organisation à l'échelle du site et les fluctuations de la production. En tenant compte de ces échelles d'étude, la plus fine étant celle d'une installation et la plus grossière celle du territoire, il a été envisagé de sélectionner des types des sites intéressants afin d'étudier la variabilité des bilans environnementaux selon les exploitations.

Ce chapitre présente, tout d'abord, la démarche qui a été suivie afin de sélectionner les sites à étudier. Par la suite, chacun des trois sites ainsi choisis est décrit selon une approche d'abord assez générale donnant la situation géographique/géologique et le fonctionnement de l'exploitation. Ensuite, pour chaque volet environnemental considéré, les différentes démarches qui ont été mises en œuvre pour acquérir les renseignements nécessaires à l'élaboration de l'outil sont exposées. Une présentation suivie d'une analyse des données collectées pour trois sites est proposée afin de dégager les caractéristiques essentielles de production : bilan matière, équipements, engins et le cas échéant explosifs. Enfin, une discussion relative aux éléments importants à retenir pour développer l'outil d'évaluation est réalisée.

II- Démarche d'études des sites

L'ensemble des réflexions conduites, tant à l'échelle géographique qu'à l'échelle des sites, est récapitulée sur la figure 19 afin de montrer la progression dans la démarche.

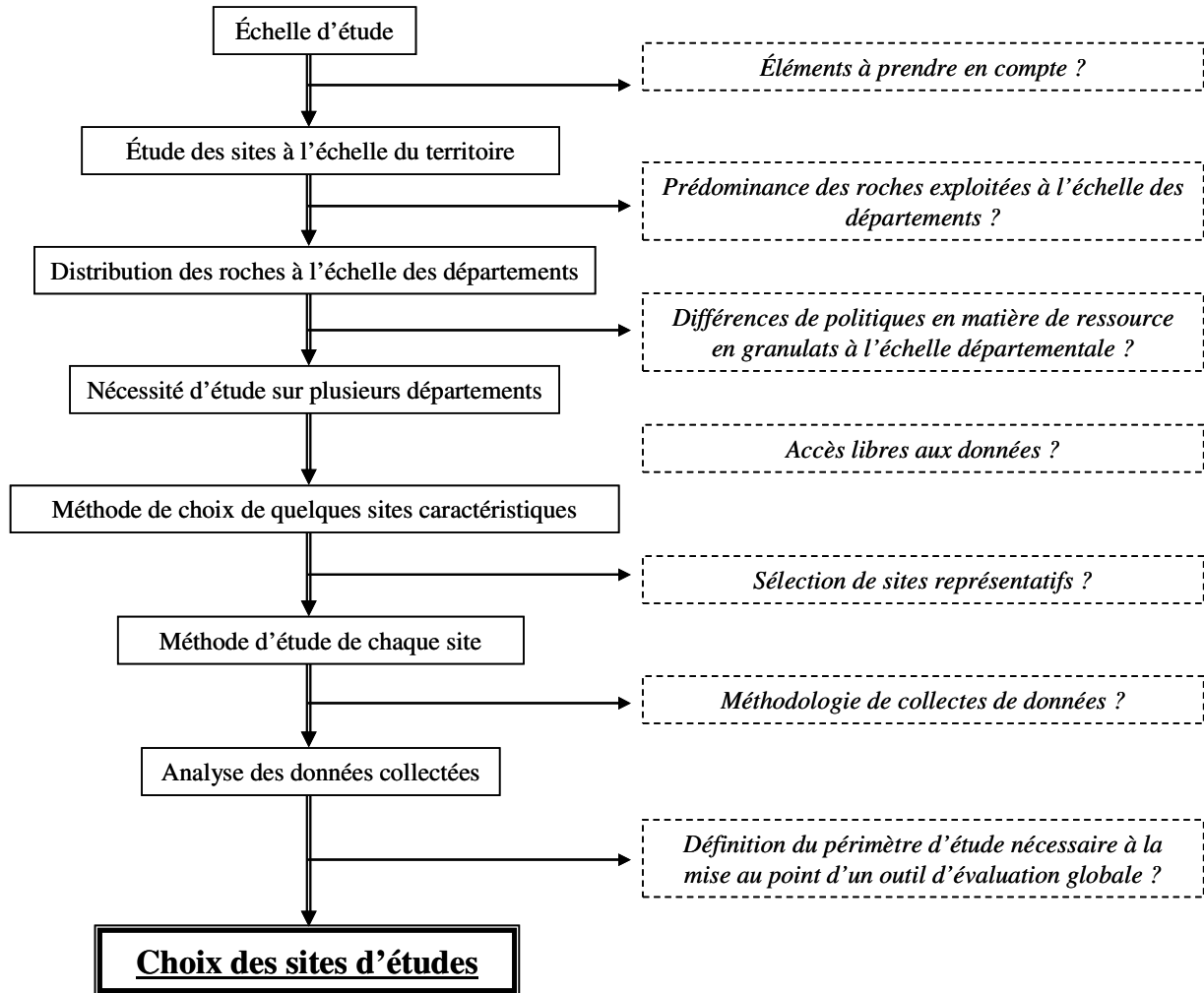


Fig. 19 : Représentation des investigations réalisées à différentes échelles géographiques

II.1- Recherche d'une échelle géographique d'étude pertinente

Vue la complexité des formations géologiques et du tissu industriel, il est apparu primordial de mener, en priorité, une réflexion à l'échelle du territoire afin de définir une stratégie d'études de site de carrière pertinente. Cette réflexion fournit en effet un bon panorama des disponibilités régionales et permet de dégager des prédominances par catégories de roches exploitées (Fig.20). On retrouve une certaine correspondance des roches exploitées avec la nature géologique du sous-sol. En effet, à l'exception du massif alpin, les grands domaines géologiques français se dessinent : les massifs armoricain et central et les grands bassins sédimentaires parisien et aquitain.

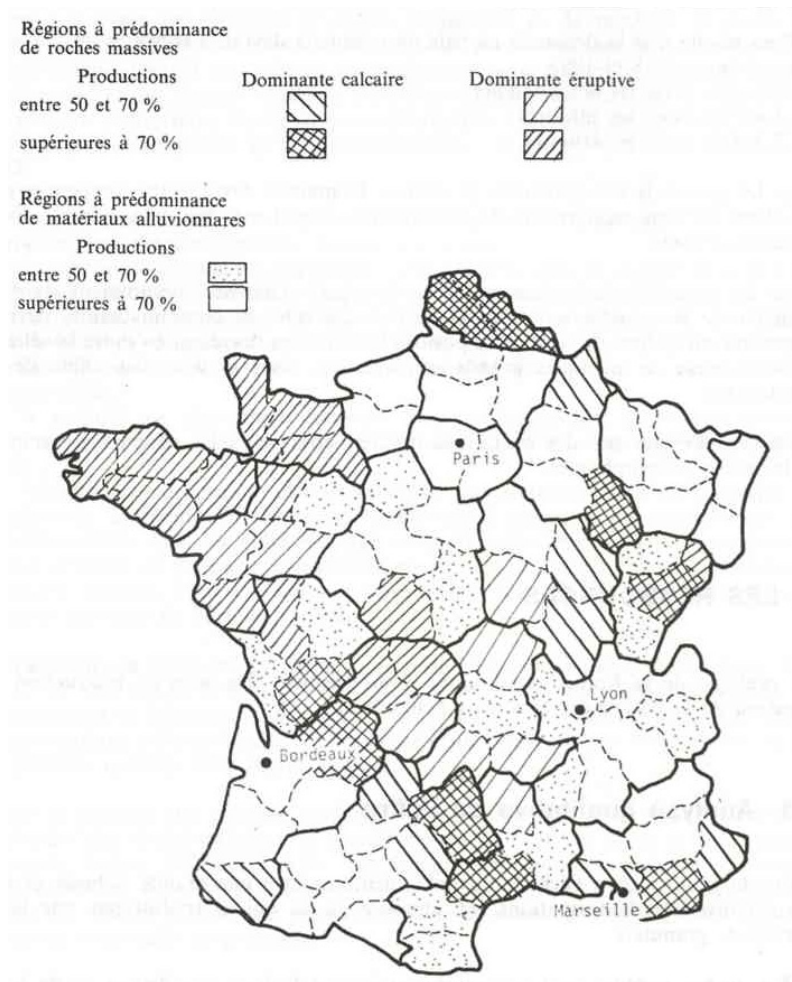


Fig. 20 : Répartition géographique des productions de granulats (Arquié et al., 1990^a)

Par la suite, différents acteurs français ont été contactés : administrations dans le domaine de l'environnement, syndicat professionnel, exploitants, LRPC (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées). Les contacts ont essentiellement visé à obtenir des listes d'exploitations de carrières à l'échelle départementale afin de repérer leur nombre, leur distribution et l'hétérogénéité des ressources exploitées à l'échelle nationale. Pour ce faire, l'ensemble des DRIRE (régionales ou départementales) ont été contactées (seules quelques-unes n'ont pas transmis les renseignements demandés). Par ailleurs, certaines informations n'étant pas accessibles et/ou disponibles, un accès à la base de données GIDIC (Gestion Informatique des Données d'Installations Classées) du MEDD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable) a été demandé. Celui-ci a été refusé car réservé aux inspecteurs des ICPE. Ainsi, un recensement des exploitations sur l'ensemble du territoire national (hors DOM-TOM) a pu être effectué et l'acquisition de données concernant le nombre de carrières par département est reporté dans le tableau 6. On observe des grandes disparités quant à la répartition des exploitations de carrière sur le territoire national, tant à l'échelle départementale qu'à l'échelle régionale. A titre d'exemple, la région Bourgogne compte 262 sites répertoriés ; le département des Côtes d'Or disposant de 115 sites d'exploitation alors que celui de la Nièvre (pourtant limitrophe) n'en compte que 34.

Tableau 6 : Recensement des exploitations de carrière sur le territoire national

Région	Nb carrières	Département	Nb carrières	Région	Nb carrières	Département	Nb carrières
Alsace	143	Bas Rhin	93	Lorraine	NC	Meurthe et Moselle	NC
		Haut Rhin	50			Meuse	
		Dordogne	NC			Moselle	
Aquitaine	98	Gironde	98			Vosges	
		Landes	NC	Midi-Pyrénées	429	Arriège	21
		Lot et Garonne	NC			Aveyron	64
		Pyrénées Atlantiques	NC			Gers	19
		Allier	73			Haute Garonne	71
Auvergne	245	Cantal	49			Haute Pyrénées	28
		Haute Loire	54			Lot et Garonne	67
		Puy de Dôme	69			Tarn	129
		Côtes d'Or	115			Tarn et Garonne	30
		Nièvre	34	Nord Pas de Calais	75	Nord	21
Bourgogne	262	Saône et Loire	43			Pas de Calais	54
		Yonne	70			Calvados	38
Bretagne	337	Côtes d'Armor	98	Basse Normandie	112	La Manche	53
		Finistère	87			Orne	21
		Île et villaine	82			Eure	27
		Morbihan	70	Haute Normandie	70	Seine Maritime	43
		Cher	48			Alpes Côtes d'Azur	24
Centre	281	Eure et Loir	39	PACA	225	Hautes Alpes	41
		Indre	52			Alpes Maritimes	29
		Indre et Loire	44			Bouches du Rhône	40
		Loir et Cher	46			Var	33
		Loiret	52			Vaucluse	58
		Ardennes	28			Loire Atlantique	72
Champagne Ardennes	217	Aube	62	Pays de la Loire	302	Maine et Loire	95
		Marne	86			Mayenne	25
		Haute Marne	41			Sarthe	66
		Corse du Sud	11			Vendée	44
Corse	26	Corse du Nord	15			Aisne	83
		Doubs	52	Picardie	202	Oise	68
		Jura	48			Somme	51
Franche Comté	160	Haute Saône	52			Charente	98
		Territoire de Belfort	8	Poitou Charente	260	Charente Maritime	65
Île de France	111	Île de France	111			Deux Sèvres	32
		Aude	60			Vienne	65
		Gard	86			Ain	370
		Hérault	53	Rhône Alpes	1996	Ardèche	109
Languedoc Roussignon	262	Lozère	36			Drôme	304
		Pyrénées Orientales	27			Isère	360
		Corrèze	26			La Loire	200
		Creuse	21			Le Rhône	173
Limousin	76	Haute Vienne	29			Savoie	186
						Haute Savoie	294

Compte tenu de ces disparités en nombre d'exploitations de carrières, le niveau de production a ensuite été analysé à une échelle régionale (Fig.21). Il en ressort également de grandes différences d'une région à une autre. A titre d'exemple, la région Limousin n'a produit que $5,7 \cdot 10^6$ tonnes en 2004 contre plus de $42 \cdot 10^6$ tonnes pour la région Pays de la Loire (UNPG, 2004).

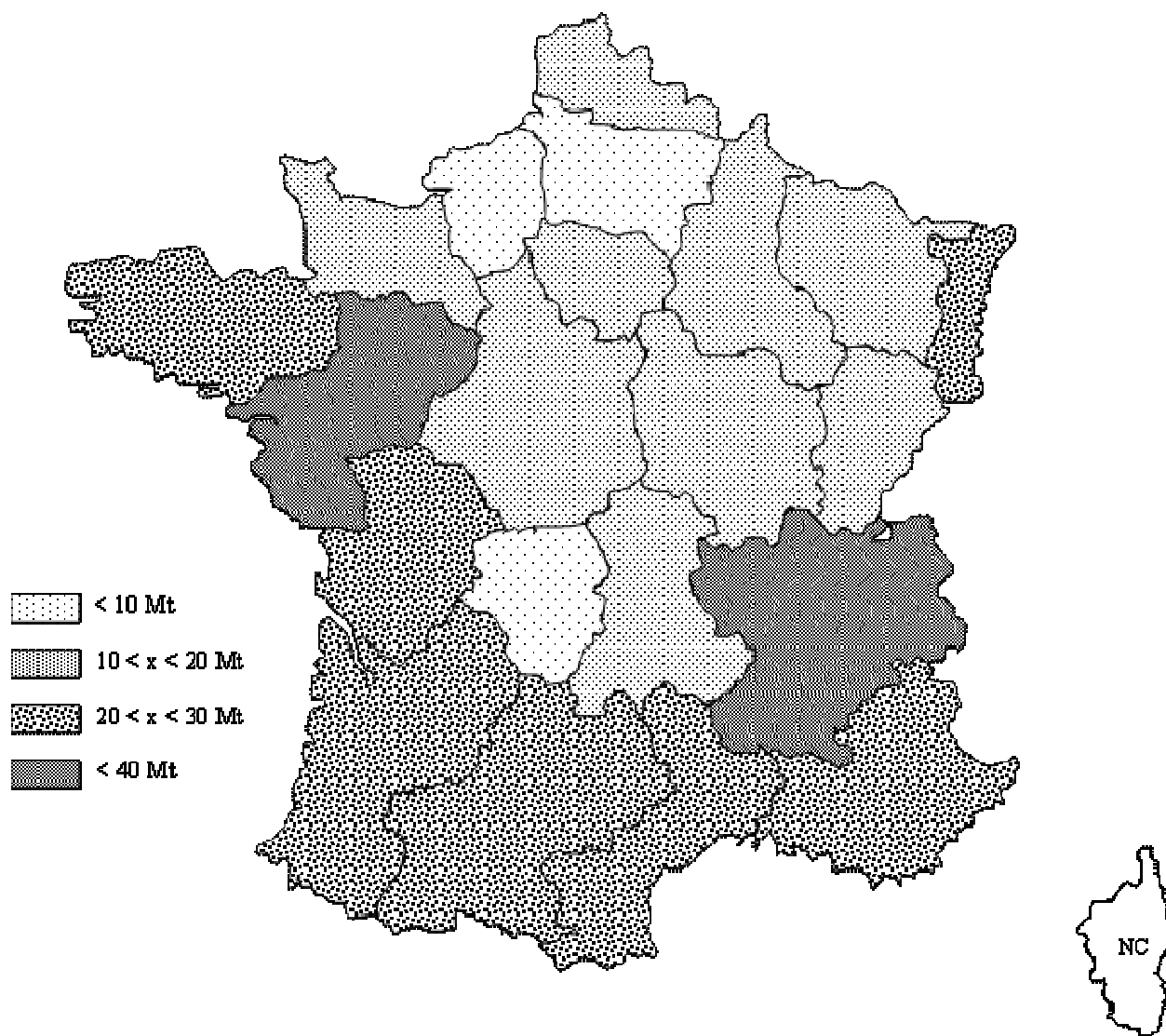


Fig. 21 : Production annuelle de granulats par région administrative

Finalement une analyse plus détaillée a été réalisée à l'échelle départementale. Le tableau 7 présente un exemple de la distribution des sites de carrières dans le département de la Loire-Atlantique. Soixante douze exploitations sont recensées dans ce département d'environ 6 800 km² pour 1 200 000 habitants. Près de 60 % (43 sites sur 72) des carrières répertoriées exploitent des roches massives. Notons également la présence de 8 exploitations ne produisant pas de granulats mais d'autres matériaux tels que les argiles ou la tourbe ; matériaux qui ne rentrent pas dans le cadre de la thèse.

Tableau 7 : Les carrières en Loire-Atlantique en 2005 (source : DRIRE 44)

Commune	Type de carrières	Nature du matériaux	Commune	Type de carrières	Nature du matériaux
A vessac	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Herbignac	Roches massives	<i>Gneiss</i>
Grand Auverné	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	La Haie-Fouassière - Vertou	Roches massives	<i>Gneiss</i>
Guenrouet	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	La Turballe	Roches massives	<i>Gneiss</i>
Guenrouet	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Petit Mars	Roches massives	<i>Gneiss</i>
La Baule	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Prinquiau	Roches massives	<i>Gneiss</i>
La Grignonais	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Quilly	Roches massives	<i>Gneiss</i>
La Grignonais	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Rouans	Roches massives	<i>Gneiss</i>
La Grignonais	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Saint Viaud	Roches massives	<i>Gneiss</i>
La Marne	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Sainte Pazanne	Roches massives	<i>Gneiss</i>
Missillac	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Ste-Anne sur Brivet	Roches massives	<i>Gneiss</i>
Missillac	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Vieilleville	Roches massives	<i>Gneiss</i>
Pannecé	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Gorges	Roches massives	<i>Granite</i>
Paulx	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	La Turballe	Roches massives	<i>Granite</i>
Quilly	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Mésanger	Roches massives	<i>Granite</i>
Quilly	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Vallet	Roches massives	<i>Granite</i>
Saint Colomban	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Fercé	Roches massives	<i>Grès</i>
Saint Colomban	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Guémené Penfao	Roches massives	<i>Grès</i>
Saint Colomban	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Joué-sur-Erdre	Roches massives	<i>Grès</i>
Saint Sulpice des Landes	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	Saint Aubin des Châteaux	Roches massives	<i>Grès</i>
Teillé	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	A vessac	Roches massives	<i>Schiste</i>
Vritz	Roches meubles	<i>Sable ind. Siliceux</i>	A vessac	Roches massives	<i>Schiste</i>
Erbray	Roches massives	<i>Calcaire</i>	A vessac	Roches massives	<i>Schiste</i>
Campbon	Roches massives	<i>Dolomie</i>	La Chapelle Basse-Mer	Roches massives	<i>Schiste</i>
Bouguenais	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Mesquer	Roches massives	<i>Schiste</i>
Bouguenais	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Nozay	Roches massives	<i>Schiste</i>
Campbon	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Nozay	Roches massives	<i>Schiste</i>
Campbon	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Séverac	Roches massives	<i>Schiste</i>
Casson	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Séverac	Roches massives	<i>Schiste</i>
Chauvé	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Saffré	Autres matériaux	<i>Argile</i>
Chéméré	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Saint Aubin des Châteaux	Autres matériaux	<i>Argile</i>
Chéméré et Rouans	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Saint Aubin des Châteaux	Autres matériaux	<i>Argile</i>
Donges	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Vallet	Autres matériaux	<i>Argile</i>
Donges	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Saint Mars du Désert	Autres matériaux	<i>Tourbe brune</i>
Gorges	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Saint Mars du Désert	Autres matériaux	<i>Tourbe brune</i>
Gorges	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Saint Mars du Désert	Autres matériaux	<i>Tourbe brune</i>
Guenrouet	Roches massives	<i>Gneiss</i>	Sucé	Autres matériaux	<i>Tourbe brune</i>

Compte tenu de l'ensemble de ces disparités (nombre et production) à l'échelle du territoire, il a été tout d'abord envisagé la création d'une base de données « Carrières » compatible avec un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) de type Mapinfo. Une telle base aurait eu pour but de réaliser un SIG permettant de visualiser la répartition géographique des exploitations vis-à-vis des infrastructures routières, des communes, des natures géologiques du sous-sol et des zones de protection environnementale. Ce travail avait un double objectif : repérer des gisements potentiellement exploitables dans une zone donnée, recenser et accéder rapidement aux exploitations existantes pour répondre aux besoins en granulats à l'échelle départementale. Mais devant l'ampleur des paramètres à étudier, les zones d'études ont d'abord été réduites à quelques régions en particulier. Puis, le travail se situant plutôt à l'échelle de l'installation et se limitant au périmètre de cette dernière, il a paru judicieux de se limiter seulement à quelques exploitations.

II.2- Recherche de critères d'études de sites de carrière pertinents

Après les précédents constats, la priorité a été mise sur la possibilité d'obtenir des données pertinentes pour une évaluation environnementale. Dans ce cadre, les possibilités de collaborations avec des exploitants différents et/ou d'accéder à des sites, gérés par le même exploitant mais dont les roches sont de nature géologique différentes, ont été examinées. Plusieurs opportunités se sont présentées dans des régions différentes, relatives à des exploitations différenciées par la nature de la roche exploitée, leur capacité de production et leurs procédés d'élaboration (engins et équipements).

Un premier site de carrière retenu a permis de réaliser des essais détaillés de caractérisations des matériaux traversant l'installation d'élaboration des granulats au travers des différents équipements de concassage/criblage, et donc d'aborder par des mesures de terrain, les distributions granulaires et leurs trajets au cours de leur élaboration. Ce site a également permis de constituer une collecte de données environnementales, adaptée aux carrières de roches massives. A ce stade de la collecte de données, il s'agissait plutôt d'appréhender l'organisation du site et le découpage en différentes zones dédiées aux procédés de fabrication des granulats ; une analyse de la méthode d'exploitation était aussi envisagée dans le temps (chronologie des arrêtés préfectoraux d'autorisation) et dans l'espace (fonctionnement des différentes zones et connexions entre elle). Enfin, une analyse de la production a été envisagée à l'échelle de plusieurs années, tout en collectant des données correspondant à des plages de temps de plus en plus petites (mois puis semaine) afin de mettre en évidence les échelles significatives d'étude à retenir.

Ensuite, une campagne de collecte de données a été réalisée pour un autre site offrant, une base de travail relative aux exploitations de roches alluvionnaires. Avant de procéder à la collecte de données, des questionnaires spécifiques ont été préparés. L'un a été dédié aux collectes de données disponibles au siège de la société (Annexe 1) et l'autre renseigné lors des visites sur les sites d'exploitations (Annexe 2). Les principes d'acquisition de données dans le cadre de ces questionnaires ont porté sur diverses thématiques : situation géographique et réglementaire, caractéristiques des matériaux produits (géotechniques et production), données relatives aux autres produits du site considéré (découverte, roches altérées et sous-produits), consommations énergétiques (électricité et carburants) et en eau, nuisances (bruit, vibration et poussière), type et quantité de déchets ainsi que leur filière d'élimination, données relatives aux engins et aux différents équipements, nombre d'emplois générés par l'exploitation, données « économiques » (investissement, garanties financières de remise en état, ...).

Enfin un troisième site a également été retenu pour compléter le panel de données retenues et permettre une investigation assez large relative aux types d'exploitations existantes sur le territoire français.

Chaque site retenu a donc fait l'objet d'une visite et d'une discussion avec l'exploitant à l'issue desquelles, un compte-rendu détaillé a été rédigé de manière à décrire, à la fois, la situation géographique et l'historique du site, les procédés d'élaboration et de production mais aussi l'ensemble des aspects environnementaux, économiques et sociaux. Sur la base de ces comptes-rendus, une synthèse des données collectées a été effectuée ; celle-ci est restituée dans la suite de ce chapitre.

III- Présentation des sites étudiés

L'ensemble des trois sites sélectionnés finalement diffèrent selon : le type de roche exploitée ou leur production (Fig.22). Ainsi, les sites n°1 et 2 présentent des productions globalement équivalentes mais exploitent des roches différentes de par leur cohésion mécanique ; les sites n°2 et 3 élaborent des granulats à partir du même type de roches en l'occurrence les alluvions de la Loire mais différent de par leur production, le site n°2 élaborant deux fois plus de granulats que le site n°3.

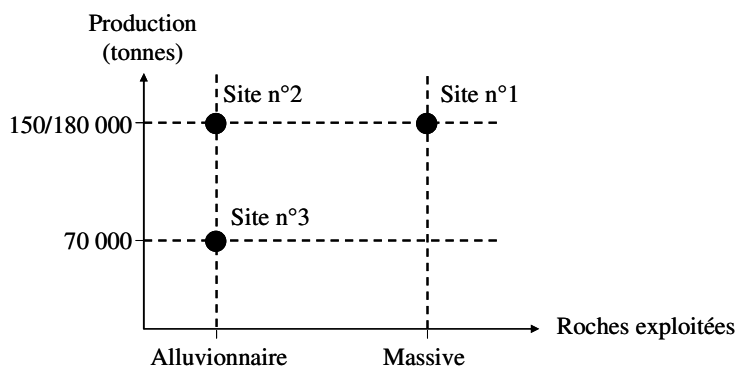


Fig. 22 : Caractéristiques des sites étudiés en fonction de la nature des roches exploitées et des productions

Le site n°1 (carrière de roches massives) a fait l'objet de campagne de mesure principalement au niveau de son installation de traitement. Différents appareillages de mesure de la masse transportée, vitesse de transport associée et analyses granulométriques ont permis une étude fine des consommations énergétiques pour un scénario classique de production de l'exploitation. Les données des sites n°2 et 3 ont quant à elles été collectées directement auprès de l'exploitant dans le cadre des deux questionnaires. Afin que ces données soient pertinentes entre elles, les sites retenus n°2 et 3 sont gérés par la même société.

III.1 -Site d'étude n°1 : carrière de roches massives

Le granulat étant un produit pondéreux, les transports sur de longues distances doivent être limités afin de pouvoir fournir aux clients un produit à des conditions économiques acceptables. La multiplication des carrières réparties de façon harmonieuse sur l'ensemble du territoire permet de répondre à cette demande. C'est ainsi qu'environ 300 sites sont implantés en Bretagne dont près de 100 pour le seul département des Côtes d'Armor.

III.1.1- Implantation et autorisation d'exploiter

Le premier site d'exploitation se localise au Nord-Ouest du département des Côtes d'Armor (Fig.23). Il est implanté dans une zone à caractère rural dominant, en rive gauche d'une rivière. Outre ce cours d'eau longeant une partie du site, les abords de la carrière sont principalement occupés par des terrains agricoles (cultures, prairies) et des boisements.



Fig. 23 : Localisation géographique du site n° 1

Cette exploitation a été ouverte en 1892 par les Ponts et Chaussées de l'époque pour les besoins de l'aménagement d'une actuelle route départementale. L'excellente qualité de la roche, les réserves disponibles à long terme et la proximité d'une voie carrossable contribuèrent à la pérennité de l'exploitation, qui se contenta jusque dans les années 30, de subvenir aux demandes locales. En 1976, un arrêté préfectoral du 13 décembre autorise l'exploitation de cette carrière. Cet arrêté a été renouvelé par les arrêtés préfectoraux du 23 janvier 1984 et du 4 mars 1988 alors que les carrières étaient encore sous le régime du Code Minier. Suite à une demande d'extension de l'activité extractive présentée en 1997 et accordée le 30 juin 1997, l'exploitation couvre aujourd'hui une vingtaine d'hectares pour une durée d'exploitation de 30 ans.

III.1.2- Nature et utilisation des matériaux

Avec une production d'environ 180 000 tonnes en 2003, l'exploitation se situe dans la moyenne inférieure des zones d'exploitation bretonnes qui ont une production moyenne annuelle de l'ordre de 220 000 à 250 000 tonnes (UNICEM). Le gisement exploité est composé d'un ensemble de formations plus ou moins métamorphisées du domaine Nord-Armoricain, domaine extrêmement complexe composé d'unités d'âge compris entre 2 milliards d'années (Ga) et 540 millions d'années (Ma). Plus précisément, le site se situe au Sud du Batholite Nord-Trégorois (granite) et à l'Ouest d'une apophyse du massif granitique de Plouaret (daté de 330 Ma). Ce massif recoupe des formations plus anciennes (diorites, micaschistes et amphibolites) au sein desquelles se trouve la carrière (Egal et al., 1996).

Les caractéristiques géotechniques des matériaux (Tableau 8) autorisent l'usage des granulats produits par la carrière en couche de roulement de chaussées.

A ce titre, l'essentiel voire la quasi-totalité de la production est acheminée vers une centrale d'enrobage située à proximité directe de l'exploitation.

Tableau 8 : Caractéristiques géotechniques des granulats produits

CPA	Los Angeles	Micro Deval	Masse volumique (t.m ⁻³)
0,54	14 à 16	14 à 22	2,84
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de St Brieuc, communication orale			déterminée selon la norme NF EN 1097-6

III.1.3- Organisation de la production

Le premier site comprend deux zones principales que sont la zone d'extraction et la zone d'élaboration. On note également la présence d'un certain nombre d'installations annexes.

- **Zone d'extraction**

L'arrêté préfectoral de 1997 précise que l'exploitation sera limitée en profondeur à une cote supérieure à celle du cours d'eau au droit de la carrière (9 m NGF environ). Cette profondeur autorisée dénommée « carreau de l'exploitation » est, quant à elle, fixée à la cote moyenne de 12 m NGF. La zone d'extraction se répartie sur 3 fronts de taille (Fig.24) d'une hauteur moyenne de 20 m chacun (32, 52, 70 m NGF) sous jacents aux matériaux de découverte (Terres végétales et roches très altérées) d'épaisseur maximale inférieure à 10 m (Fig.25).

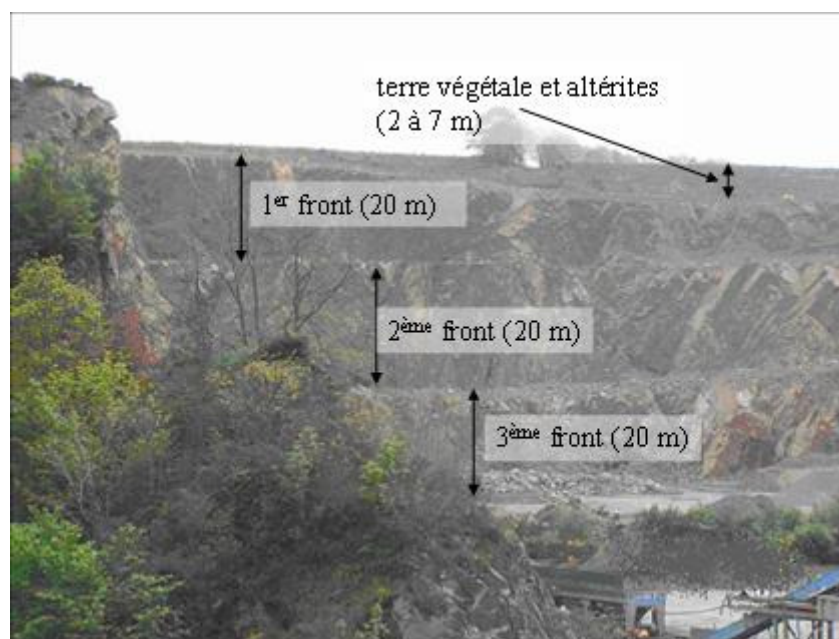


Fig. 24 : Vue générale de la zone d'extraction

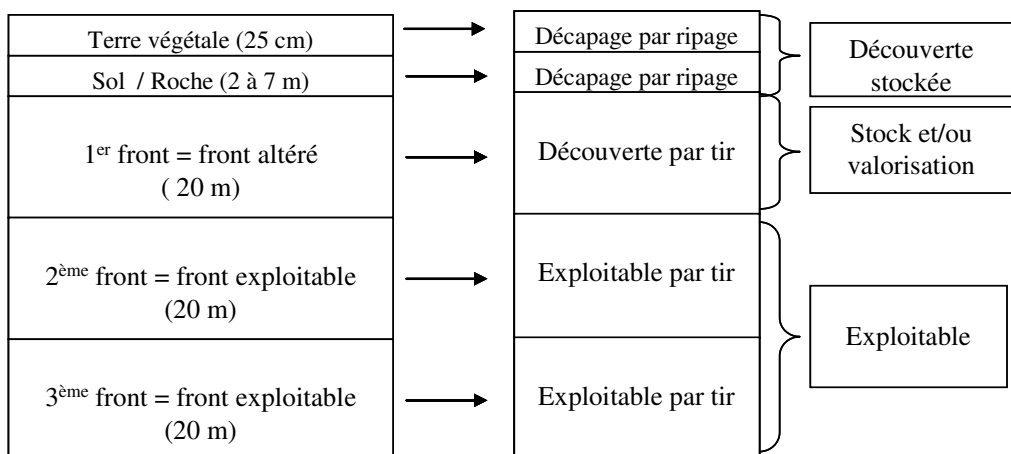


Fig. 25 : Représentation schématique de la zone d'extraction

Les matériaux de découverte ainsi que les horizons très altérés de la roche sont extraits, autant que possible, mécaniquement par ripage (phase qui n'a pu être étudiée du fait de l'absence de période de découverte pendant la durée de la campagne de mesure). La terre végétale est stockée à part, sur le site sous forme de merlon, en attente d'être réutilisée lors de la remise en état à la fin de l'exploitation du gisement. Les matériaux très altérés sont également stockés sur l'enceinte du site. L'utilisation d'explosifs, nécessitant une foration préalable du front de taille, permet d'extraire les matériaux (cf chapitre 1).

- **Zone d'élaboration**

Le brut d'abattage ainsi obtenu, est acheminé par dumper, après chargement à la pelle mécanique, jusqu'à l'installation d'élaboration des matériaux (Fig.26), située à proximité de la zone d'extraction.

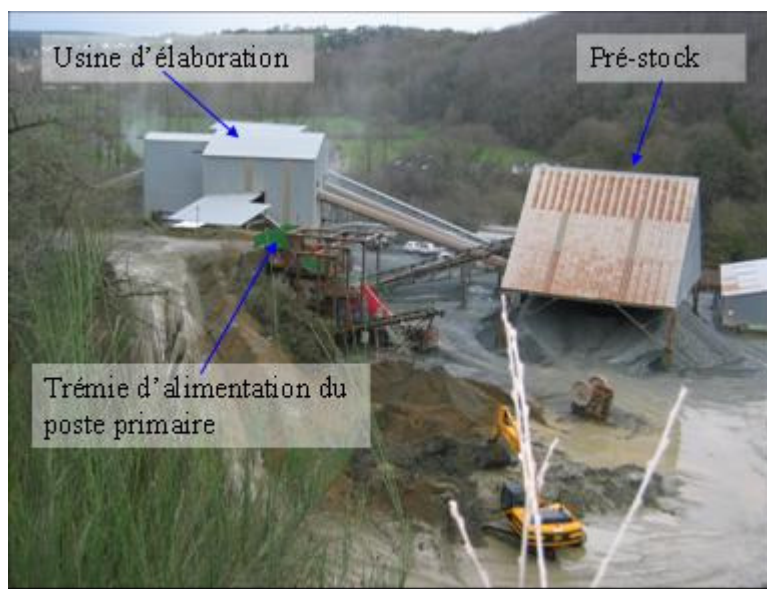


Fig. 26 : La zone d'élaboration du site n°1

L'installation d'élaboration et de traitement des matériaux schématisée en figure 27 reprenant la codification des différents équipements, se subdivise en 3 grands postes : le primaire, le secondaire et le tertiaire qui vont fournir des matériaux de plus en plus élaborés.

- **le poste primaire** : après un passage sur un scalpeur (*Sc*), les matériaux sont criblés sur un crible primaire (*CR1*) afin d'en éliminer les produits dont la taille est inférieure à 30 mm ("le stérile") : matériaux contenant les fractions argileuses non désirées dans les produits finis. Un essai au bleu de méthylène (AFNOR, 1999) a été réalisé sur ce matériau et fourni une valeur de 5.2 ce qui traduit une présence importante de particules argileuses. Les matériaux valorisables vont subir un premier concassage dont le but est de réduire la taille des blocs afin que ces derniers puissent être transportés sur les bandes transporteuses. A la sortie du concasseur à mâchoire (*CM1*), les produits obtenus vont être criblés (*CR2*) pour extraire le 0/31,5 P.

- **le poste secondaire** : les fractions >31.5 vont alimenter, par l'intermédiaire d'un extracteur (*ALV3*), un concasseur giratoire (*CG1*) dont l'objectif va être, à nouveau, de réduire la granulométrie des matériaux qui vont ensuite être acheminés vers un stock au sol couvert : le pré-stock. Ultérieurement extraits puis transportés via les bandes transporteuses, les matériaux sont dirigés vers un crible (*CR3*) qui va permettre d'obtenir les premières coupures commercialisables dites « secondaires », en l'occurrence 0/6,3 ; 6,3/31,5 et > 31,5. Ces matériaux sont stockés en trémies autorisant le chargement direct de tombereaux qui vont alors être dirigés vers les zones de stockage sur site.

- **le poste tertiaire** : les fractions >31.5 et 6.3/31.5 du poste secondaire peuvent aussi alimenter un second concasseur giratoire (*CG3*). Les produits de ce nouveau concassage (0/40) sont alors dirigés vers une série de crible (*CR4*, *CR5*) parallèles produisant les fractions dites « tertiaires » >14, 10/14, 6.3/10, 4/6.3 et 0/4. La coupure la plus fine peut être reprise et acheminées vers un dernier crible (*CR6*) pour produire les fractions sableuses : 0/2 et les petits gravillons : 2/4. Les matériaux dont la taille est supérieure à 14 mm vont être recyclés, via une bande transporteuse, vers le poste secondaire : réincorporation directe dans la trémie de >31,5. Une partie des coupures 10/14, 6,3/10 et 4/6,3 peut également être reprise et réinjectée dans le but d'obtenir les fractions de granulométrie inférieure. Le recyclage de ces granulats s'effectue au sein du poste tertiaire : le 10/14 pouvant être renvoyés vers les deux concasseurs *CG2* et *CG3* alors que les 6,3/10 et 4/6,3 sont systématiquement acheminés vers le concasseur *CG2*.

Outre ces trois postes principaux, plusieurs circuits de recirculation (réinjection de certaines fractions granulométriques dans le système principal) existent dans le but d'obtenir des fractions de granulométrie inférieure.

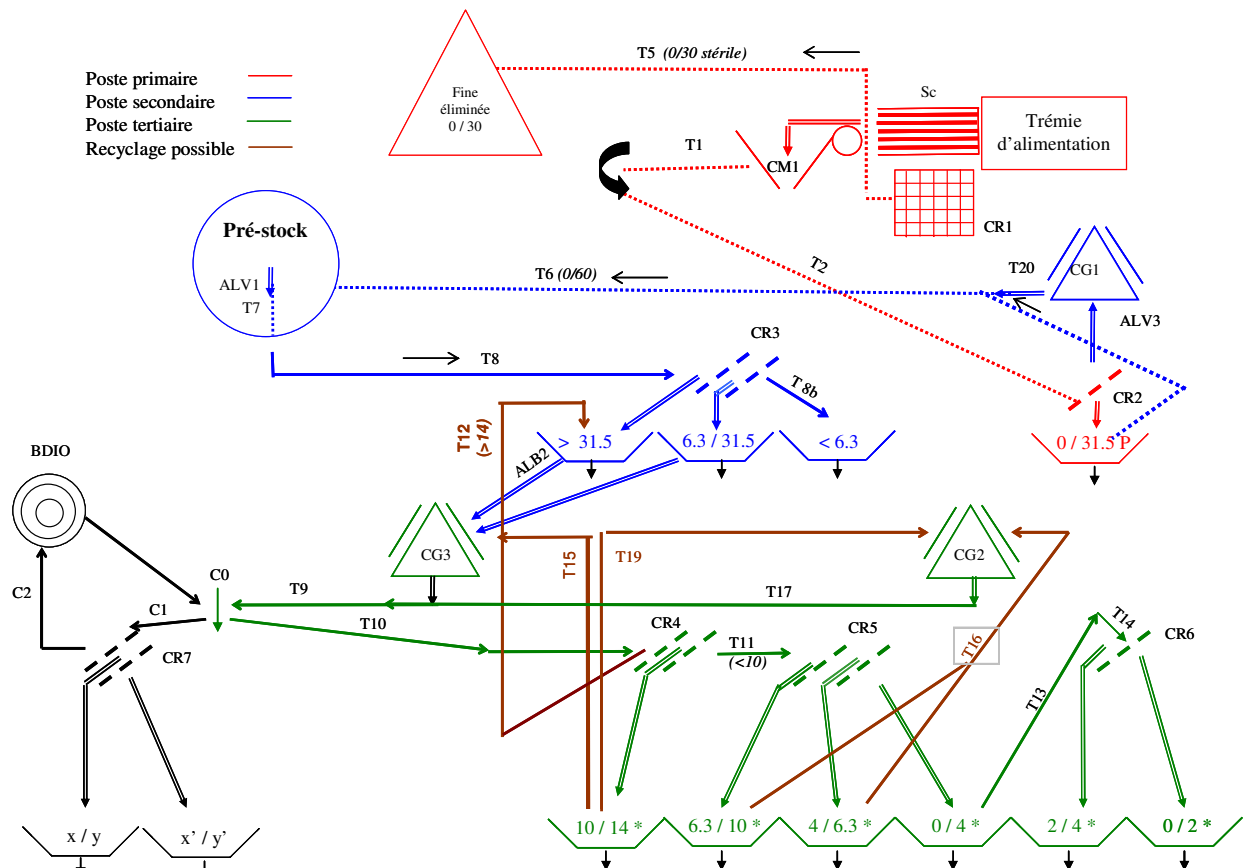


Fig. 27 : Synoptique de l'installation d'élaboration de la carrière de roches massives (site n°1)

De plus, il est possible de laver ces différentes fractions (10/14, 6.3/10, 4/6.3, 0/4, 2/4 et 0/2) sur un crible de lavage. Pour ce faire, un système de collecte et de traitement des eaux est mis en place : les eaux de ruissellement présentes sur l'ensemble du site d'exploitation sont dirigées vers une lagune de décantation d'une capacité d'environ 5000 m³. Ces eaux sont alors reprises par pompage et acheminées, par une canalisation souterraine, vers une citerne de transfert. L'eau claire nécessaire au lavage des matériaux est reprise depuis cette citerne jusqu'aux installations de lavage. Les eaux chargées en Matière En Suspension (MES) sont collectées vers 3 bassins de décantation. Ces derniers, disposés en cascades ont une capacité totale de 200 m³. L'eau ainsi décantée est reprise par pompage et retournée vers la lagune précédemment citée. D'autre part, l'éventuel trop-plein d'eau « claire » de la citerne de transfert est évacué vers le cours d'eau. Cependant, aucun lavage n'a été effectué au cours de la période d'expérimentation menée sur le site 1.

• Annexes de l'installation

En dehors des zones et des organes propres à la production, le site comprend un certain nombre d'aménagements et d'équipements localisés à proximité de l'installation d'élaboration des matériaux ; en particulier :

- l'ensemble du site est alimenté en énergie électrique par le réseau EDF grâce à un transformateur d'une puissance de 630 kVA,
- le fuel destiné à alimenter les engins de carrière est stocké dans 2 cuves (2500 et 3000 l), équipées d'un bac de rétention d'une capacité équivalente (dalle en béton et muret),

- les huiles nécessaires au bon fonctionnement des engins à moteurs ainsi que les huiles de transmission hydraulique sont stockées dans des cuves dans un local (dalle en béton),
- un atelier couvrant une surface d'environ 200 m² est utilisé pour l'entretien et les réparations des engins et du matériel, le stockage temporaires des pneus, bandes transporteuses et cribles usagés,
- outre les différents bâtiments existants à proximité des installations de traitements des matériaux (vestiaires, sanitaires, bureaux, salles de réunion...), il convient également de signaler la présence du secrétariat et d'un pont-bascule à la sortie de la carrière.

III.1.4- Collectes de données relatives au site n°1

La réalisation d'une évaluation environnementale, fondée sur la circulation de flux de matériaux nécessite tout d'abord la connaissance des bilans matières de l'exploitation proprement dite. Ce premier site a permis d'aborder cette question grâce à un certain nombre de données collectées directement auprès de l'exploitant mais aussi par l'appui de différentes mesures effectuées sur le site. L'ensemble de données collectées fournissent des valeurs de production et de circulation de matériaux au sein de l'exploitation depuis la zone d'extraction (Fig.24) jusqu'à l'usine d'élaboration (Fig.27) ainsi que les différents moyens nécessaires à cette circulation (engin, équipement et explosif).

• *Description de la production du site n°1*

Après chaque tir, les matériaux abattus sont repris par une pelle mécanique puis chargés dans un dumper pour être dirigés vers les installations de traitements. La charge transportée par chaque dumper est plus ou moins régulière et approximativement connue par l'exploitant (pour le site n°1, 27 tonnes). Connaissant le nombre de tours entre la zone d'extraction et la zone d'élaboration (données collectées auprès de l'exploitant), il apparaît donc possible de déterminer la masse de matériaux transportés jusqu'à l'installation d'élaboration et donc la production horaire moyenne (Tableau 9). Une maintenance importante (changement du concasseur secondaire CG1) a engendré un arrêt de la production au mois de mai ce qui explique l'absence de ce dernier dans le tableau 9.

Tableau 9 : Bilan des masses de matériaux transportés jusqu'à l'installation d'élaboration

Mois	Date de production	Nombre de jours de production	Nombre de tours	Production mensuelle (t)	Production journalière (t)	Production horaire (t)
Février	du 02 au 26	16	528	14 256	891	118,8
Mars	du 01 au 31	19	782	21 114	1 111	148,2
Avril	du 01 au 29	16	646	17 442	1 090	145,4
Juin	du 01 au 30	18	832	22 464	1 248	166,4
Moyenne		17,25	697	18 819	1 085	144,7

L'estimation des demandes énergétiques au cours de la phase de traitement des matériaux nécessite une étape de quantification plus détaillée des flux de matière au sein des différents postes considérés. Dans notre cas, l'idée première a consisté à poser des systèmes de pesée sur différentes bandes transporteuses de l'installation. Cependant, la faible quantité de bascules disponibles a limité ce procédé. Pour remédier à cet inconvénient, un placement stratégique des appareils de mesure (Fig.28) et la réalisation de prélèvements sur bande (AFNOR, 1996) ont permis de connaître la distribution des différentes fractions possibles.

En effet, en effectuant une analyse granulométrique (AFNOR, 1997^a) sur chacun des prélèvements, il est possible de connaître le rapport de masse entre chaque coupure et le total, en considérant toutefois l'efficacité des cribles de l'installation optimale. Cette hypothèse n'est malheureusement qu'approximative puisque les performances des cribles ne sont jamais maximales (cf chapitre I).

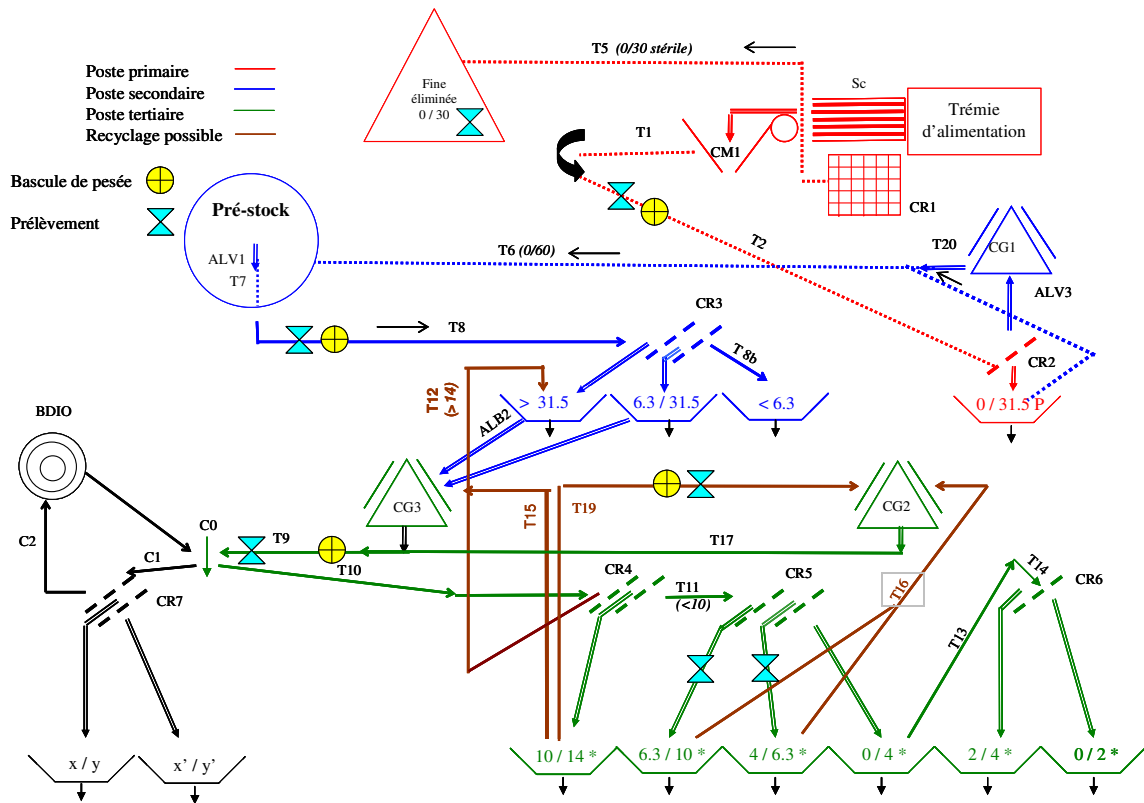


Fig. 28 : Positionnement des prélèvements et des systèmes de pesée

A l'issue des mesures réalisées, malheureusement, les quantités de matériaux circulant sur les bandes transporteuses, fournies par les systèmes de pesée, se sont avérées être erronées vis à vis des informations communiquées par l'exploitant, en l'occurrence 1000 t.j^{-1} environ. Par contre, les pesons ont pu montrer la régularité des quantités circulant sur les bandes au cours du temps et le cas échéant, la durée au cours de laquelle la bande transporteuse fonctionne à vide. Le choix s'est alors orienté vers une deuxième solution permettant des mesures de vitesse des bandes transporteuses à l'aide d'un tachymètre. Ainsi, en croisant le poids de matériaux contenus sur un mètre de bande, la vitesse de cette même bande et le rapport "en charge/à vide", les débits maximum théoriques ont pu être estimés (Tableau 10).

Tableau 10 : Calcul des débits journaliers

Tapis	T2	T8	T9	T19
Vitesse moyenne (m.min ⁻¹)	82,5	108,2	101,4	90,33
Poids (kg.m ⁻¹)	55	19,77	29,8	6,54
Débit (kg.h ⁻¹)	272250	128347	181303	35447
Débit (t.h ⁻¹)	272	128	181	35
Temps en charge/à vide (%)	64	80	100	100
Débit (t.h ⁻¹) réel	174	103	181	35
Débit réel journalier (t.j ⁻¹)	1350	796	1405	275

La campagne de mesure sur le poste primaire n'a pu être réalisée que sur une durée très brève (< 2 heures) et ne serait donc être représentative de la production réelle. De plus, le débit observé à l'entrée de l'installation de traitement (1 350 t.j⁻¹) est plus élevé que ceux fournis par : l'exploitant (1 000 t.j⁻¹) et par le calcul de production journalière (cf tableau 9: 1 085 t.j⁻¹). Dans la suite de ce travail, la valeur prise en compte à l'entrée de l'installation de traitement des matériaux est de 1000 t.j⁻¹ et la quantité de « stérile » éliminée lors du scalpage (Sc) a été considérée comme négligeable vis à vis de la production journalière

Les chemins suivis par les granulats au sein de l'installation représentés sur la figure 28, sont schématisés en figures 29 et 30. La figure 29 exprime les proportions respectives des différentes classes granulométriques lors de leur passage direct au sein de l'installation de traitement.

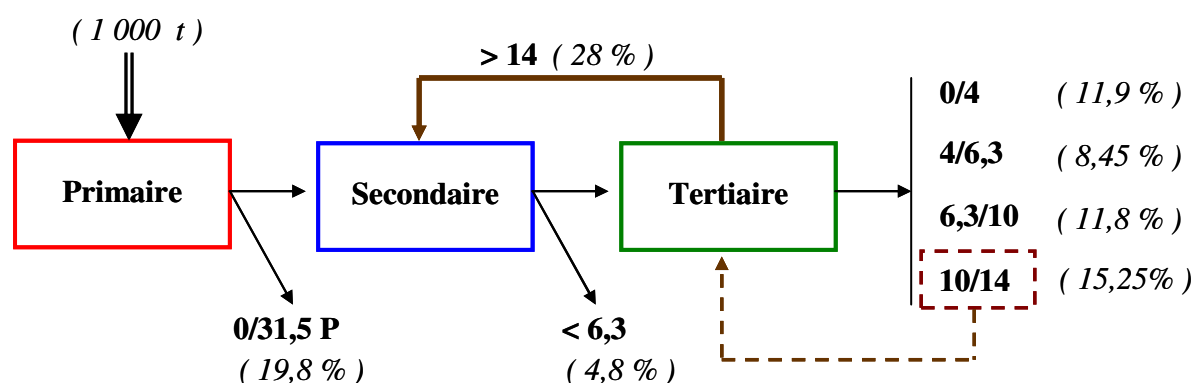


Fig. 29 : Chemin de circulation des granulats dans l'installation de traitement du site n°1

La figure 30 illustre quant à elle, le bilan massique des différentes fractions produites et commercialisables en sortie de l'installation. Ainsi, la fraction > 14 qui est réinjectée dans le poste secondaire (Fig.29), est redistribuée au niveau des différentes fractions granulométriques en sortie du poste tertiaire. Cette distribution a été effectuée à partir des analyses granulométriques réalisées. Les valeurs ainsi obtenues se corréleront avec les données fournies par l'exploitant vis-à-vis des productions respectives des différentes classes granulométriques produites.

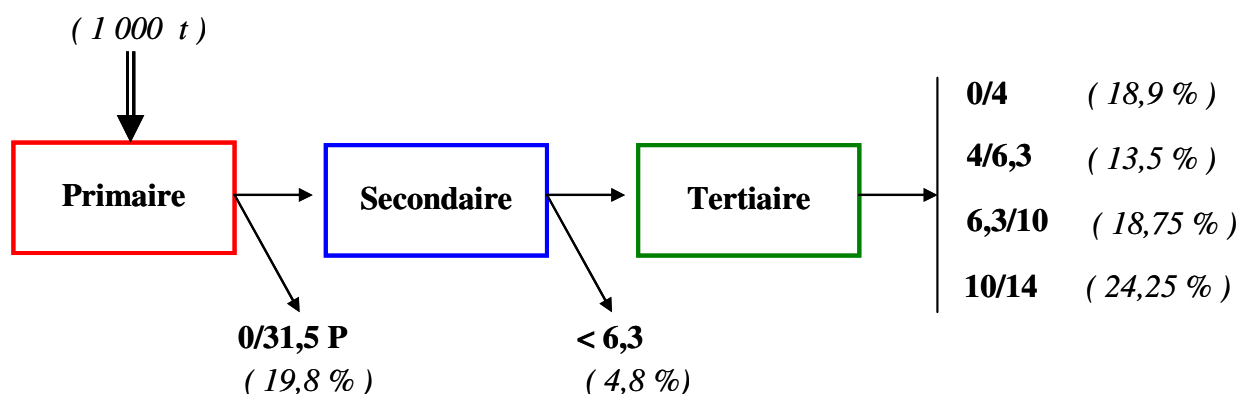


Fig. 30 : Bilan massique du site n°1

• Description des engins recensés sur le site n°1

Cinq engins de chantiers ont été recensés au sein de l'exploitation. Leurs caractéristiques respectives (année de mise en circulation, puissance, consommation, poste de travail) ont été obtenues soit directement auprès de l'exploitant (ou du sous-traitant concernant la foreuse) soit déterminées lors de la campagne de mesure par un relevé quotidien à la fois du nombre de litres consommés et du nombre d'heures de fonctionnement des engins (Tableau 11).

Tableau 11 : Caractéristiques des différents engins présents sur le site n°1

Engin	Année de mise en circulation	Puissance (kW)	Consommation (l.h ⁻¹)	Poste de travail
Dumper R350 trx	2001	238	11,8	extraction
Pelle JCP 330	1999	169	17	extraction
Chargeur Caterpillar 950 F	1997	134	14,48	chargement client
Tombereau Perlini	1978 mais moteur 1990	179	5,78	déstockage
Foreuse Tamrock 1100	2002	220	55	foration

• Description des équipements présents sur le site n°1

La première étape de référencement des différents équipements présents a consisté à répertorier l'ensemble des moteurs nécessaires au fonctionnement des différents équipements présents au sein de l'installation de traitements des matériaux (Fig.27) ainsi que leurs caractéristiques respectives. La seconde étape a consisté à mesurer les valeurs d'ampérage, à l'aide d'une pince ampèremétrique, pour chacun des moteurs en fonctionnement afin de pouvoir ensuite déterminer les puissances réellement consommées (Tableau 12). En effet, il est primordial de connaître précisément ces valeurs afin de pouvoir évaluer les demandes énergétiques de la production de granulats au sein d'une exploitation de carrière.

Tableau 12 : Caractéristiques des différents moteurs électriques du site n°1

Poste	Référence (figure 27)	P _{nominale} (kW)	cos φ	I _{mesurée} (A)	P _{absorbée} (kW)
<u>Primaire</u>	SC	30	0,83	20	11
	CM1	90	0,83	120	66
	CR1	7,5	0,85	12	7
	T5	4	0,84	5,4	3
	T1	5,5	0,83	7	4
<u>Secondaire</u>	T2	15	0,85	20	11
	CR2	11	0,85	9,7	5
	ALV3	2,2	0,86	5	3
		2,2	0,86	5	3
	CG1	131	0,85	135	76
	T20	5	0,84	5	3
	T6	15	0,85	20	11
	ALV1	2,2	0,85	4	2
	T7	4	0,84	5,9	3
	T8	9	0,86	18	10
	CR3	11	0,84	9,7	5
	T8b	5,5	0,85	4,9	3
<u>Tertiaire</u>	ALB2	3	0,81	6	3
	CG3	110	0,86	180	102
	T9	5,5	0,85	7	4
	C0	3	0,85	6	3
	T10	9	0,85	15	8
	CR4	15	0,86	10,4	6
	T15	5,5	0,85	7	4
	T11	5,5	0,85	7	4
	T12	4	0,84	4,4	2
	CR5	15	0,86	13,9	8
	T16	1,1	0,79	4,6	2
		1,1	0,79	4,6	2
	CG2	45	0,75	62	31
	T17	5,5	0,85	7	4
	T19	1,1	0,81	4	2
<u>Lavage</u>	T1L	Le poste de lavage n'est pas représenté sur le synoptique de l'exploitation et aucunes valeurs de puissances consommées n'ont été calculées pour ce poste qui ne fonctionne que de façon sporadique			
	T2L				
	CRL				
	T3L				
	P1				
	P2				

- **Description des explosifs utilisés sur le site n°1**

Les quantités d'explosifs utilisés ainsi que les différents paramètres définissant les plans de tir (cf figure 5 du chapitre 1) ont été fournis par l'exploitant (Tableau 13). Quelque soit le tir considéré, l'ensemble des paramètres présentent une certaine régularité. Toutefois, il convient de remarquer des variations importantes des quantités respectives de chaque explosif utilisé d'un tir à l'autre.

Tableau 13 : Plans de tir réalisés sur le site n°1 et quantités des différents explosifs utilisés

Tir n°	Nb de rangées	Nb de trou /rangée	profondeur (m)	diamètre (mm)	inclinaison (°)	Banquette (m)	Espacement (m)	Maille (m²)	Explosifs (kg)					V théorique (m³)
									Dynaroc 9	Nitram	Nitral	Nitro D8	Total	
1	1	12	23.5+0.5	115	10	3.5	4	14	350	325	350	325	1350	4032
2	1	10	23.5+0.5	115	10	3.5	4	14	175	100	500	325	1100	3430
3	1	12	24+0.5	115	10	3.5	4	14	300	500	250	350	1400	4116
4	1	11	24.5+0.5	115	10	3.5	4	14	225	50	500	475	1250	3850
5	1	11	24+0.5	115	10	3.5	4	14	275		475	600	1350	3773

III.2 -site d'étude n°2 : carrière de roches alluvionnaires

Le site n°2 est situé sur la rive gauche de la Loire, dans le département du Loiret (45) dans la région Orléanaise. La région Centre compte près de 300 exploitations de carrières globalement bien réparties en nombre sur l'ensemble de ces départements. Ainsi, 52 sites de carrière sont recensés sur le département du Loiret.

III.2.1- Implantation et autorisation d'exploiter

Implantée dans un paysage à caractère rural dominant, l'exploitation se trouve à proximité de l'axe ligérien reconnu par 5 ZNIEFF, 1 ZICO, 1 natura 2000, 1 arrêté de protection du biotope (DIREN).

Le site exploite, depuis 1995 (arrêté préfectoral du 19 juillet 1995, modifié le 31 juillet 1997), un gisement de roches alluvionnaires. Initialement prévu sur une surface d'environ 40ha (36ha 86a 79ca), l'exploitation couvre aujourd'hui près de 100ha (98ha 08a 10ca). En effet, la société exploitante a obtenu, par arrêté préfectoral du 06 juillet 2005, l'autorisation de poursuivre et d'étendre son activité sur une durée de 24 ans. Cependant, les abords de l'exploitation de carrière sont tenus à une distance horizontale d'au moins 10 m des limites du périmètre autorisé. De plus, une bande d'une largeur minimale de 150 m sera maintenue entre l'exploitation et les habitations riveraines. De ce fait, 14ha 74a 16ca (01ha 77a 74ca +12ha 96a 42ca) de la surface totale autorisée ne peuvent être exploités.

De plus, par arrêté préfectoral du 15 avril 1987, une installation de traitement des matériaux ainsi qu'une station de reconstitution des sables sont présentes sur le périmètre de l'exploitation actuelle.

III.2.2- Nature et utilisation des matériaux

Les granulats produits sont issus de roches sédimentaires alluvionnaires : les alluvions holocènes et modernes (code Fz et Fy). Ces dépôts fluviaux sont composés de sables et de gravillons de couleur beige à marron clair. Le site produit les classes granulométriques dont les proportions sont reportées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Répartition granulométrique moyenne de matériaux extraits et produits

	Sables			Gravillons			Pertes
	0/2	0/4 sc	0/4 f	2/6	4/12,5	8/20	
Extraction	4%	56%		5%	10%	12%	13%
Production	5%	33%	31%	6%	11%	14%	/
	69%			31%			/

Notons que 13 % des quantités extraites «sont perdues» au cours de l'élaboration des granulats sur le site n°2. Ces pertes correspondent aux fractions non valorisables, éliminées lors des lavages des matériaux.

Les caractéristiques intrinsèques des matériaux du site n°2 sont présentées dans le tableau 15. Les granulats produits sur le site n°2 sont strictement réservés à un usage local ; la distance moyenne sur laquelle ils vont être transportés, par voie routière, ne dépasse pas les 20 km. La grande majorité (80%) est destinée à la fabrication de béton et de tuiles tandis que le reste de la production (20%) est directement vendue aux particuliers sur le site.

Tableau 15 : Caractéristiques intrinsèques de granulats produits (d'après fiche commerciale)

LA	20
MDE	4
Alcali-Réaction	Potentiellement Réactif
Gélivité	Non Gélif

III.2.3- Organisation de la production

Le deuxième site comprend trois zones principales que sont la zone d'extraction, la zone d'élaboration et la centrale de recomposition. Par ailleurs, comme sur le site n°1, un certain nombre d'installations annexes sont présentes sur le site. Cependant, il ne nous apparaît pas nécessaire de les présenter pour chacun des sites étudiés car globalement toujours les mêmes même si leurs caractéristiques peuvent changer d'un site à un autre.

- ***Zone d'extraction***

Les alluvions anciennes exploitées ne se trouvent pas directement en surface. Pour les extraire, il faut tout d'abord décaper le sol, ou « terre végétale », d'environ 30 cm d'épaisseur et environ 2,4 m de matériaux « stériles » constitués de sables limoneux (Le Borgne, 2001). Les quantités de « terre végétale » sont utilisées afin de former des merlons, protecteur de nuisances et le stérile est, quant à lui, utilisé en remblais dans les zones en cours de réaménagement. Suite au renouvellement et à l'extension de l'arrêté préfectoral d'autorisation de juillet 2005, aucune extraction n'a été effectuée sur l'exploitation entre juillet et décembre 2006, en raison de l'aménagement du nouveau site d'extraction. Au cours de cette période, les granulats ont été élaborés à partir des stocks de tout venant et/ou par l'achat de ce dernier à la concurrence. Depuis la reprise des travaux d'extraction, le matériau est extrait, par pelle mécanique, puis transporté jusqu'à une plate forme via dumpers (environ 500 m) puis acheminé jusqu'à la zone d'élaboration via des convoyeurs à bande non capotés (1700 m).

- ***Zone d'élaboration***

Le matériau extrait ou « tout-venant » est transporté jusqu'à une aire de stockage (Fig.31). Cette aire, inexistante sur le site n°1, constitue une zone tampon permettant de produire de façon quasi continue en évitant, ou tout au moins en réduisant, d'éventuels arrêts de production lors des périodes de découvertes de gisement ou de changement de zones d'extraction.

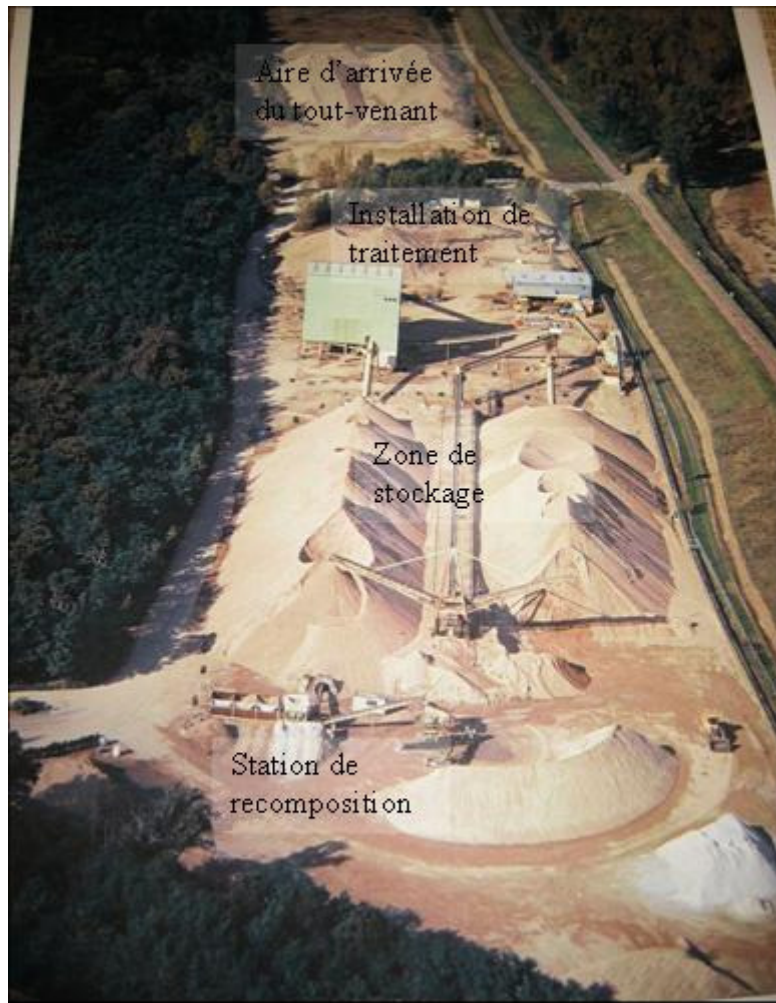


Fig. 31 : Vue aérienne de la zone d'élaboration des matériaux

Le tout-venant est ultérieurement repris (toujours via convoyeurs à bandes) jusqu'à l'installation de lavage-débourbeur qui est composé d'un crible à partir duquel le matériau va suivre des circuits différents selon sa granulométrie. La fraction >20 va être injectée dans le débourbeur qui va éliminer les mottes de terres argileuses en les cassant. La fraction intermédiaire ($5/20$) va directement être envoyée vers le pré-stock. La fraction sableuse est quant à elle nettoyée lors de son passage dans un cyclone couplé avec un essoreur (Fig.32). En effet, le lavage des sables est indispensable car la présence de particules argileuses sur les matériaux diminue considérablement l'adhérence du ciment sur les grains de sables lors de la fabrication des bétons (Le Borgne, 2001).

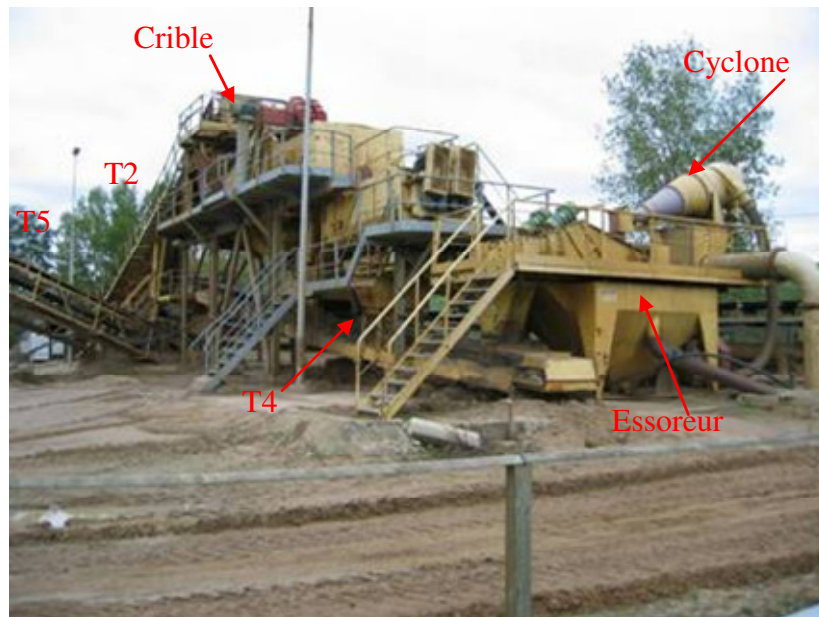


Fig. 32 : Le système laveur-débourbeur

Comme pour le site 1, la figure 33 schématise l'ensemble des composants qui sont présentés ci-dessous en reprenant la codification des différents équipements.

A la sortie de ce premier traitement, les matériaux sont stockés en tas au sol et ainsi constitué le « pré-stock » qui est, ultérieurement, injecté dans l'installation d'élaboration proprement dite, via un tunnel de reprise. L'objectif de cette dernière est multiple : trier et séparer les granulats selon leur classe granulométrique, laver (enfin relaver pour une partie) les granulats afin d'éliminer les particules argileuses restantes et enfin concasser les éléments de grande taille (dans le cas de site 2, la fraction >20). Pour ce faire, une série de cribles (CV2, CV3 et CV4), de convoyeurs à bandes (T_i) de pompes à sables (PS), d'essoreur (ES) et de concasseurs (G1 et G2) sont utilisés.

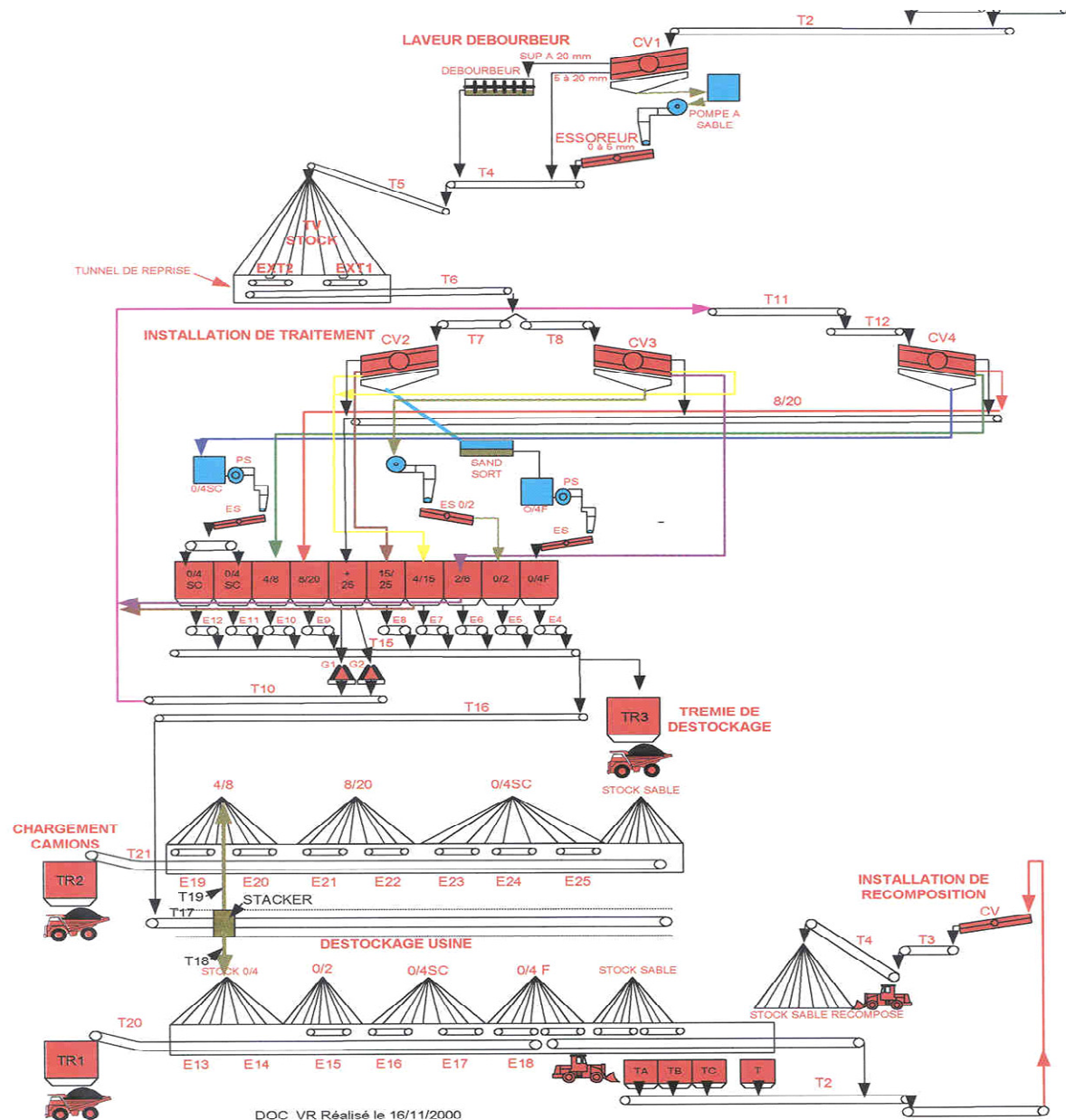


Fig. 33 : Synoptique de l'installation de traitement du site de roches alluvionnaires : site n°2

Les granulats lavés et classés en fonction de leur granulométrie sont ensuite acheminés, toujours par convoyeurs à bandes (T15 et T16) vers la zone de stockage ou pour alimenter une trémie afin de charger directement les clients (encadré pointillé sur la figure 34). Le ravitaillement de la zone de stockage s'effectue grâce à une série de convoyeurs à bandes (T18 et T19) et d'un stacker se déplaçant sur la bande T17. Ce dernier répartit, en stocks au sol, les différentes classes de granulats vendus.

Le chargement client peut s'effectuer, à partir de ces différents tas, selon deux possibilités : l'utilisation d'un chargeur sur pneus ou l'utilisation de trémies. Dans ce cas, les stocks sont repris par en-dessous afin d'alimenter un nouveau convoyeur à bandes (T20 et T21) qui déverse les granulats dans les trémies de chargement (double encadré sur la figure 34).



Fig. 34 : Les trémies de stockage et de déstockage à la sortie de l'installation de traitement

Les eaux issues des lavages sont très argileuses, et rejetées via un réseau souterrain dans un premier bassin de décantation (avec flocculateur) qui se déverse dans un second, qui lui-même se déverse dans un troisième dans lequel l'eau est considérée comme « claire ». Grâce à une pompe ayant un débit d'environ $350 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, cette eau claire va pouvoir être réutilisée, après réacheminement, dans l'installation de traitement pour les opérations de lavage. Cependant, lors des lavages successifs des granulats au cours de leur élaboration nécessitent d'importantes quantités d'eaux supérieures au débit de pompage des eaux claires. Ainsi, pour alimenter, en appoint, les systèmes de lavages présents au sein de l'installation, deux pompes prélèvent de l'eau dans la nappe avec un débit d'environ $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ chacune.

La floculation/décantation des particules argileuses génère la formation de boues de décantation. Ainsi, les bassins doivent être régulièrement « récurés » et les boues sont ensuite utilisées pour remblayer les zones déjà exploitées et en cours de réaménagement.

- ***Centrale de recomposition***

Au sud de la zone de stockage des granulats se trouve la centrale de recomposition. Cette dernière est destinée à fournir des matériaux dont la composition granulométrique est prédéfinie de manière très précise. Dans le cas de l'exploitation du site n°2, il s'agit d'un 0/4 (nommé 0/4 recomp). Pour ce faire, le chargeur sur pneu vient alimenter des petites trémies qui vont, elles-mêmes, être déversées lors de l'ouverture des trappes sur un convoyeur à bande (T2) qui acheminera les matériaux jusqu'à un crible (CV). Par l'intermédiaire de deux nouveaux convoyeurs à bandes (T3 et T4), le sable 0/4 recomposé est stocké au sol (Fig.35).



Fig. 35 : La centrale de recomposition

III.2.4- Collectes de données relatives au site n°2

La collecte de données du site n°2 a porté plus particulièrement sur l'analyse des valeurs de production et des consommations énergétiques (tous types confondus) pour plusieurs années.

- *Description de la production du site n°2*

Les données de production mensuelle sur les années 2004 et 2005 (Tableau 16) ont été fournies par l'exploitant. Le site n°2 produit en moyenne 150 000 tonnes annuellement. Cependant, il convient de noter une forte variabilité de valeurs de production mensuelles.

Tableau 16 : Productions mensuelles du site n°2

Mois	Production 2004 (tonnes)	Production 2005 (tonnes)
Janvier	0	11 444
Février	3 139	0
Mars	19 779	13 949
Avril	21 412	10 382
Mai	16 969	9 808
Juin	18 538	8 787
Juillet	27 844	6 550
Août	5 493	1 145
Septembre	18 727	17 909
Octobre	17 918	22 363
Novembre	15 080	14 902
Décembre	12 821	7 566
Total	177 720	124 805
Moyenne mensuelle	14 810	10 400

- *Description des engins de carrières recensés sur le site n°2*

L'extraction étant sous traitée, un seul engin de chantier est nécessaire au sein de l'exploitation et est affecté aux opérations de déstockage/chargement client (chargeur L180 E). Leurs caractéristiques respectives sont illustrées dans le tableau 17.

Tableau 17 : Caractéristiques des engins présents sur le site n°2

Engin	Référence	Année de mise en circulation	Puissance (kW)	Consommation (l.h ⁻¹)	Heures travaillées entre 7 et 20 h	Poste de travail
Chargeur sur pneu	L 180 E	2005	235	20	8	Déstockage
Chargeur sur pneu	L180C	1998	198	23	3	Autres
Pelle	432D	2004	67	13	3	Autres
Pelle	EC360	2004	184	20	8	Extraction
Tombereau	A 30	2002	248	15	8	Extraction
Autres	D6 LGP	2007	149	15	8	Autres

Dans le tableau 18 sont regroupés les quantités totales, tous postes confondus, de carburant ainsi que les dépenses associées à ces consommations.

Tableau 18 : Récapitulatif des consommations et des dépenses de carburant sur le site n°2

Mois	Consommation totale 2004 (l)	Consommation totale 2005 (l)	Dépense HT 2004 (€)	Dépense HT 2005 (€)
Janvier	3 537	3 378	1 005	1 168
Février	4 711	3 565	1 261	1 233
Mars	6 433	4 539	1 722	1 570
Avril	5 065	5 366	1 356	2 121
Mai	4 980	5 146	1 476	2 034
Juin	9 401	5 293	2 820	2 092
Juillet	15 171	11 751	4 779	5 418
Août	7 260	2 220	2 541	1 023
Septembre	4 376	19 497	1 532	10 021
Octobre	3 886	20 508	1 659	10 664
Novembre	4 562	17 862	1 948	8 645
Décembre	6 121	9 351	2 117	4 414
Total	75 503	108 476	24 215	50 404
Moyenne mensuelle	6 292	9 040	2 018	4 200

• *Description des équipements présents sur le site n°2*

L'ensemble des équipements fonctionnant à l'énergie électrique ainsi que leurs caractéristiques respectives sont répertoriés dans le tableau 19. Ces données ont été fournies par l'exploitant directement. Notons que le poste « extraction » n'apparaît pas ; ceci s'explique par le fait du changement de la configuration précédemment cités. Nous rappelons que l'extraction, sur le site n°2, s'effectue depuis 2007, par pelle mécanique et que le tout venant est transporté par dumper jusqu'à une plateforme puis acheminé jusqu'à l'installation de traitement via un système de convoyeurs à bandes.

Tableau 19 : Caractéristiques des différents moteurs électriques du site n°2

lieu	Type	Référence	P _{nominale} (kW)	I _{nominale} (A)
<u>débouage</u>	convoyeur	T2	25	42
	crible	CV1	30	55
	déboureur	déboureur	30	55
	pompe	pompe cyclone	45	81
	essoreur	essoreur	3,5	6
	convoyeur	T4	18,5	35
	convoyeur	T5	18	35
<u>usine de traitement</u>	extracteur	extracteur	3,5	6
	convoyeur	T6	18,5	35
	convoyeur	T7	5,5	10,5
	convoyeur	T8	5,5	10,5
	crible	CV2	22	42
	crible	CV3	22	42
	convoyeur	T10	7,5	15
	convoyeur	T11	18	35
	convoyeur	T12	22,5	42
	crible	CV4	22	42
	convoyeur	T13	4	8,8
	convoyeur	T14	7,5	15
	essoreur	ess 0/4sc	8,5	18
	essoreur	ess 0/2	4	8,8
	essoreur	ess 0/4f	7,5	15
	pompe	pompe ess 0/4sc	90	150
	pompe	pompe ess 0/2	15	28
	pompe	pompe esso 0/4f	55	98,5
	concasseur	G1	110	194
	concasseur	G2	90	160
<u>destockage</u>	convoyeur	T15	20,5	42
	convoyeur	T16	14	28
	convoyeur	T17	18	35
	convoyeur	T18	22	42
	convoyeur	T19	22	42
	convoyeur	T20	18	35
	convoyeur	T21	18	35
	stracker	Stacker	2,2	5
<u>recomposition</u>	convoyeur	T2	7,5	15
	convoyeur	T3	7,5	15
	convoyeur	T4	7,5	15
	crible	CV	11	21,5
	convoyeur	T0	7,5	15
	convoyeur	T1	7,5	15
	convoyeur	Ta		
	convoyeur	Tb		
<u>Forage</u>	convoyeur	Tc		
	pompe	eau claire	55	98,5
	pompe	eau claire nappe 1	132	233
	pompe	eau claire nappe 2	132	233
	pompe	reprise	55	98,5
	pompe	reprise	37	67

Le tableau 20 illustre les consommations électriques et les dépenses associées.

Tableau 20 : Récapitulatif des consommations et des dépenses électriques sur le site n°2

Mois	Consommation 2004 (kWh)	Consommation 2005 (kWh)	Dépenses 2004 HT (€)	Dépenses 2005 HT (€)
Janvier	40 657	24 632	5 489	4 273
Février	73 459	29 779	8 679	4 496
Mars	157 546	92 478	16 200	10 026
Avril	143 441	59 574	6 475	3 665
Mai	128 796	62 773	5 970	3 773
Juin	115 774	47 422	5 566	3 276
Juillet	125 822	38 712	5 912	2 988
Août	41 815	34 037	3 086	2 827
Septembre	102 930	85 541	5 121	4 579
Octobre	100 567	113 392	5 056	5 525
Novembre	95 794	83 932	10 422	9 388
Décembre	103 721	54 205	11 566	6 910
Total	1 230 322	726 477	89 542	61 726
Moyenne	102 527	60 540	7 462	5 144

• *Analyse des données collectées sur le site n°2*

Au vu du schéma organisationnel d'exploitation, il apparaît nécessaire de distinguer deux sources de consommation d'énergies : l'utilisation d'engins de chantiers et celle d'électricité. Les productions de granulats, les consommations des différentes énergies ainsi que leurs proportions respectives pour 2004 et 2005 sont reportées dans le tableau 21. A l'échelle annuelle, on constate des écarts très significatifs : une forte diminution des valeurs de production (- 29,8 %) et des consommations électriques (- 41,0 %) et à l'inverse, une forte augmentation des consommations de carburant (+ 43,7 %).

Tableau 21 : Évolution de la production et des proportions respectives des consommations en électricité et en carburant sur le site n°2

	Production (tonnes)	Consommation électrique (kWh)	Consommation fioul (kWh)	Consommation totale (kWh)	% consommation électrique	% consommation fioul
2004	177 720	1 230 322	748 235	1 978 557	62,2	37,8
2005	124 805	726 477	1 074 997	1 801 474	40,3	59,7
écart 2004/2005 (%)	-29,8	-41,0	43,7	-9,0	-35,1	57,8

A ce stade, il paraît donc intéressant de définir un nouveau paramètre que nous nommerons par la suite Consommation d'Energie Spécifique de Production (CESP). Cette valeur correspond à la quantité d'énergie nécessaire à la production d'une tonne de granulats. Ceci permet d'éliminer le facteur production et ainsi d'observer plus clairement les variations des demandes énergétiques au cours du temps. Le tableau 22 précise les valeurs de CESP en électricité et en fioul pour les années 2004 et 2005. Si les CESP en électricité restent du même ordre de grandeur d'une année à l'autre (écart d'environ 15 %), elles varient du simple au double pour les combustibles fossiles avec une augmentation de plus de 100 %. Ce résultat traduit donc un accroissement des besoins/utilisations des engins sur le site n°2 au cours de l'année 2005.

Tableau 22 : CESP annuelle du site n°2

	CESP électricité (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)	CESP totale (kWh.t ⁻¹)
2004	6,92	4,21	11,13
2005	5,82	8,61	14,43
écart 2004/2005 (%)	-15,9	104,6	29,7

Les valeurs de CESP mensuelles sont à présent tracées afin d'affiner les résultats précédents. Les CESP en fioul (Fig.36) varient de façon significative ce qui indique une sensibilité forte de ce paramètre aux conditions d'exploitation. Jusqu'au mois de juillet 2005, elles sont globalement inférieures à 6 kWh.t⁻¹, exception faite de quelques mois. A partir de juillet 2005, elles augmentent de façon significative. Ceci confirme les observations faites à l'échelle annuelle et peut s'expliquer par d'importants travaux de découverte du gisement sur le site associés aux travaux de terrassement afin de mettre en place le nouveau système de convoyeurs à bandes entre la zone d'extraction et l'installation de traitement et d'élaboration des matériaux.

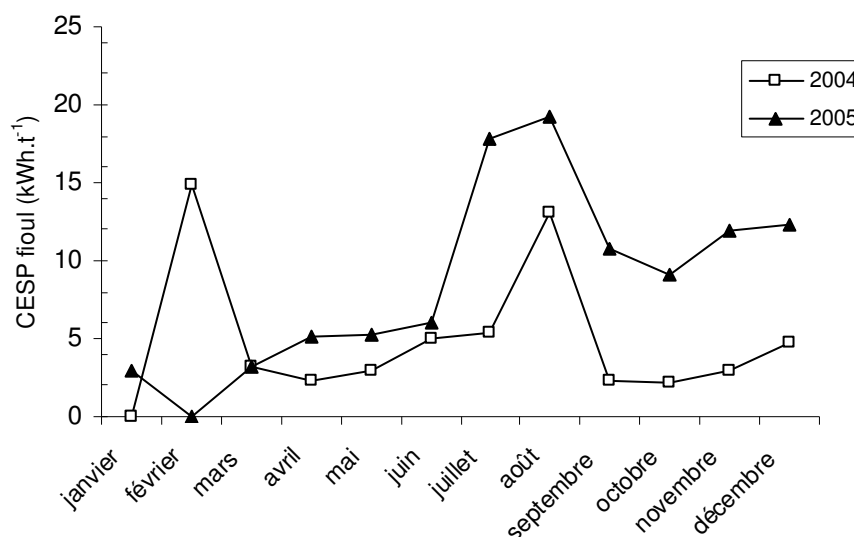


Fig. 36 : Comparaison des CESP mensuelles en carburant sur le site n°2

Concernant les valeurs des CESP mensuelles en électricité tracées en figure 37, on constate une relative régularité. En effet, sur les 22 mois où le site n°2 a produit des granulats (hormis janvier 2004 et février 2005 sans production), 87 % des valeurs de CESP en électricité sont de l'ordre de 6 kWh.t⁻¹.

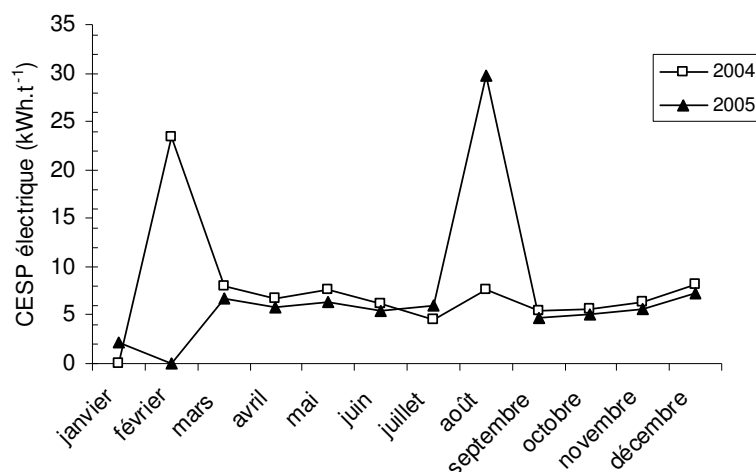


Fig. 37 : Comparaison des CESP mensuelles en électricité sur le site n°2

III.3- Site d'étude n°3 : carrière de roches alluvionnaires

Sur le périmètre de l'exploitation, on distingue, comme pour le site n°2, une zone d'extraction, une installation de traitement des matériaux ainsi qu'une station de reconstitution des sables.

III.3.1- Implantation et autorisation d'exploiter

La carrière se situe sur la rive droite de la Loire, dans le département du Loiret (45). Implantée dans un paysage à caractère rural dominant, l'exploitation se trouve à proximité de 4 zones de protections environnementales, à savoir 2 ZNIEFF, 1 ZICO, 1 natura 2000 (DIREN). Depuis 1975, le site exploite un gisement de roches alluvionnaires, par arrêté préfectoral du 18 février 1975. Plusieurs modifications de ce premier arrêté ont eu lieu (1977, 1986, 1990, 1997 et 2001). Ainsi, initialement prévue sur une surface d'environ 30 ha, l'exploitation couvre aujourd'hui une surface de 52 ha 38 a 50 ca et est autorisée à extraire le gisement jusqu'à la fin de 2013.

III.3.2- Nature et utilisation des matériaux

Les granulats produits, issus de roches sédimentaires alluvionnaires, sont composés de sables et de gravillons de couleur beige à marron clair. Ces dépôts fluviaux permettent à l'exploitant de produire différentes classes granulométriques à hauteur de 75 % de sables et 25 % de gravillons (9 % de 4/12.5 et 16 % de 4/22.4). Les caractéristiques géotechniques de ces matériaux sont reportées dans le tableau 23. De plus, l'exploitant a indiqué qu'environ 10 % des quantités extraites n'étaient pas valorisables.

Tableau 23 : Caractéristiques intrinsèques de granulats produits (d'après fiche commerciale)

LA	24
MDE	11
Alcali-Réaction	Potentiellement réactif
Gélivité	Non gélif

Les granulats produits sur le site n°3 sont principalement destinés à la fabrication de béton. A cette fin, les matériaux sont transportés, par voie routière, sur des distances avoisinant 100 km. De plus, les particuliers peuvent également directement acheter les matériaux in situ mais la proportion de ce type de vente reste très marginale.

III.3.3- Organisation de la production

- **Zone d'extraction**

Comme pour les sites n°1 et 2, les alluvions qui sont exploitées sur le site n°3 ne se trouvent pas directement en surface. Le décapage est effectué de manière sélective en séparant les terres végétales constituant l'horizon humifère (d'environ 50 cm d'épaisseur) des stériles de 1,5 à 2 m d'épaisseur et dans lesquelles sont relevées des présences de calcaires et de marnes blanches. Le défrichement des zones boisées présentes sur l'exploitation s'effectue sans contrainte et est autorisé par arrêté préfectoral du 29 juin 2000. Cependant, les périodes de décapage n'étant pas autorisées entre le 1^{er} mars et le 31 août de chaque année afin de ne pas perturber la nidification, l'exploitant effectue les phases de défrichement également hors de cette période et ce pour les mêmes raisons. Une fois, le gisement mis à nu, l'extraction du matériau s'effectue en fouille noyée à l'aide d'une dragueline (Fig.38). Le matériau extrait est transporté par des tombereaux jusqu'à l'installation de traitement situé approximativement à 1 km du site d'extraction.



Fig. 38 : L'extraction par la dragueline sur le site n°3

- **Zone d'élaboration**

Les tombereaux, acheminant le tout venant vers l'installation d'élaboration, alimentent directement une trémie de stockage d'une capacité de 20 m³ (TR1). Le synoptique de l'installation de traitements et d'élaboration du site n°3 est présenté dans la figure 39. Il schématise l'ensemble des composants qui sont présentés ci-dessous en reprenant la codification de ces différents équipements.

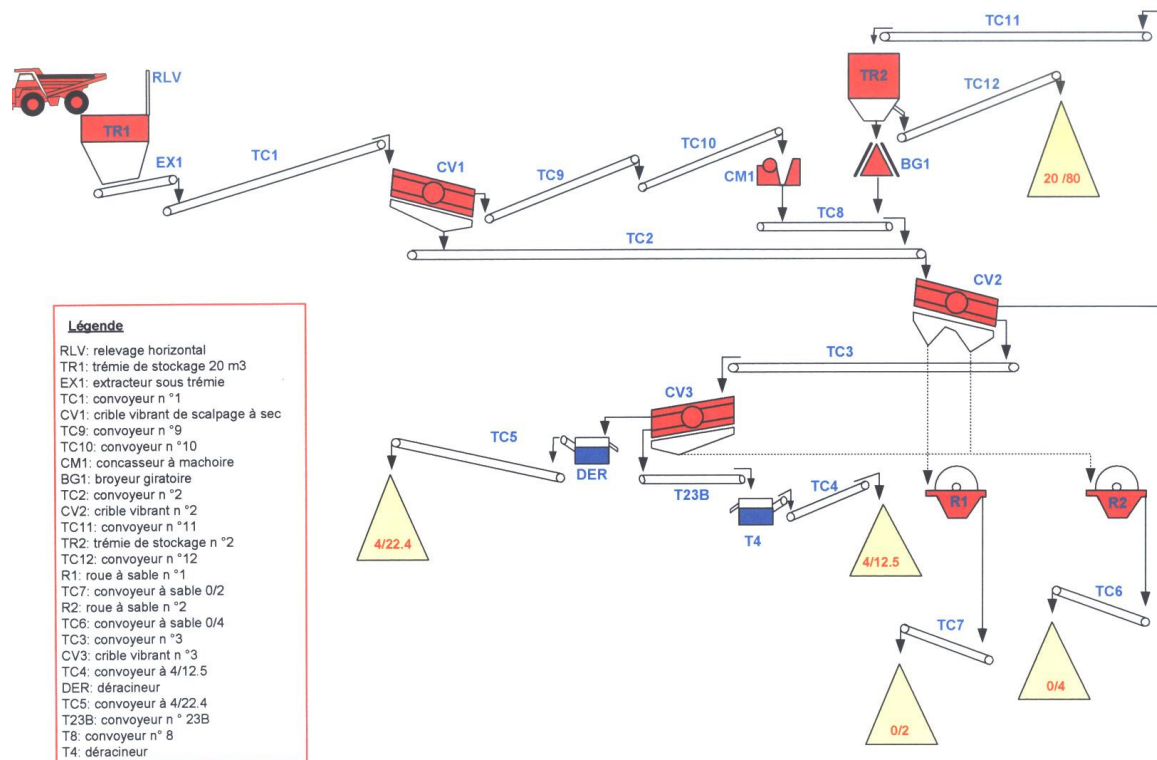


Fig. 39 : Synoptique de l'installation de traitement du site n°3

Le procédé d'élaboration du site n°3 consiste à utiliser les équipements déjà retrouvés sur le site n°1 et 2, à savoir des extracteurs (EX1), des cribles (CV1, CV2 et CV3), des convoyeurs à bandes (TC1 à TC12 et T23B), des concasseurs/broyeurs (CM1et BG1). On observe également la présence de deux roues à sables (R1 et R2 : Fig.40) et de deux déracineurs (DER et T4).



Fig. 40 : Roue à sable

Ces deux types d'équipement ont pour but de nettoyer les matériaux passants des produits indésirables (environ 10 % des quantités extraites) tels que : i) les argiles pour les fractions fines grâce à la roue à sables, ii) les racines/brindilles pour le déracineur grâce au principe de flottaison de ces composés organiques dans l'eau. Les eaux chargées de particules argileuses issues du lavage des sables sont dirigées vers un bassin de décantation qui se déverse postérieurement dans un bassin dit d'eaux claires. L'alimentation en eau de ces équipements s'effectue avec deux pompes de reprise d'eaux claires directement à partir de ce dernier bassin. Les racines et autres brindilles, en quantités relativement faibles, sont quant à elles enlevées manuellement.

- **Centrale de recomposition**

La centrale de recomposition (Fig.41 et Fig.42) se situe à proximité directe de l'installation de traitement des matériaux. L'alimentation de cette centrale (TR1 et 2) s'effectue directement par chargeur. L'extraction (EX1 et 2), le mélange (T1) puis le passage sur un crible (CV1) permettent d'obtenir le sable ainsi reconstitué avec une composition granulométrique précise (0/4 reconstitué).

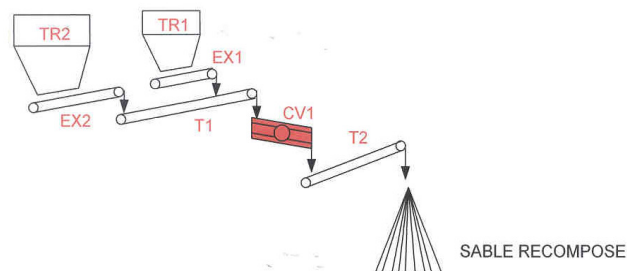


Fig. 41 : Synoptique de la centrale de recomposition du site n°3



Fig. 42 : La centrale de recomposition du site n°3

III.3.4- Collectes des données relatives au site n°3

La collecte des données sur le site n°3 a été réalisée selon la même approche que pour le site n°2. Le paragraphe présente donc l'ensemble des informations recueillies.

- **Description de la production du site n°3**

Les données de production mensuelle sur les années 2004 et 2005 (Tableau 24) ont été fournies par l'exploitant ce qui permet une approche comparable à celle du site n°2. Ainsi, 70 000 t sont produites en moyenne chaque année sur environ 105 jours de production.

Tableau 24 : Productions mensuelles du site n°3

Mois	Production 2004 (tonnes)	Production 2005 (tonnes)
Janvier	0	0
Février	420	10 521
Mars	9 844	6 504
Avril	8 316	5 503
Mai	8 230	7 226
Juin	13 206	6 030
Juillet	6 445	5 487
Août	1 427	3 138
Septembre	12 186	6 423
Octobre	12 365	6 681
Novembre	7 065	4 583
Décembre	5 321	2 137
Total	84 825	64 233
Moyenne mensuelle	7 069	5 353

- *Description des engins recensés sur le site n°3*

Comme pour le site n°2, l'extraction et le transport depuis ce poste jusqu'à l'installation de traitement sur le site n°3 sont sous-traités, à l'exception de la dragueline. De ce fait, seul le poste de déstockage nécessite l'acquisition et l'utilisation d'engins par l'exploitant (Tableau 25).

Tableau 25 : Caractéristiques des différents engins présents sur le site n°3

Engin		Année de mise en circulation	Puissance (Kw)	Consommation (l.h ⁻¹)	Poste
Exploitant	Chargeur <i>Caterpillar 966 G</i>	2000	195	29	Déstockage
	Chargeur <i>Caterpillar 950 F</i>	1992	130	19	Déstockage + rarement extraction
	Dragueline <i>Richier P85</i>	1972	90	14	extraction
Sous-traitant	Tombereau <i>Volvo 861</i>	1985	135	22	extraction
	Pelle sur chenille <i>Liebherr 912</i>	1990	100	15	extraction
	Chargeur <i>Fiat Allis</i>	1982	150	30	extraction

Le tableau 26 regroupe les quantités mensuelles totales, tous postes confondus, de carburant ainsi que les dépenses associées par ces consommations.

Tableau 26 : Récapitulatif des consommations et des dépenses de carburant sur le site n°3

Mois	Consommation 2004 (l)	Consommation 2005 (l)	Dépenses 2004 HT (€)	Dépenses 2005 HT (€)
Janvier	1 945	2 000	700	920
Février	1 814	2 723	653	1 252
Mars	4 939	3 350	1 778	1 541
Avril	4 408	4 590	1 580	2 111
Mai	3 060	2 890	1 101	1 329
Juin	6 820	6 565	2 455	3 019
Juillet	3 117	2 615	1 122	1 202
Août	2 330	4 400	910	2 024
Septembre	5 500	4 505	1 980	2 072
Octobre	7 242	4 602	2 607	2 116
Novembre	4 930	3 904	1 774	1 798
Décembre	2 400	2 564	864	4 149
Total	48 505	44 708	17 524	23 533
Moyenne	4 042	3 726	1 460	1 961

- *Description des équipements présents sur le site n°3*

L'ensemble des équipements (Fig.39) présents au sein de l'installation de traitement est décrit dans le tableau 27. Les valeurs d'intensité mesurées et fournies par l'exploitant y sont également reportées. Le tableau 28 présente pour les années 2004 et 2005, les consommations et les dépenses associées générées sur l'exploitation.

Tableau 27 : Caractéristiques des différents moteurs électriques du site n°3

Type	Référence	Tension (V)	I _{mesurée} (A)
installations			
extracteur	EX1	380	7,6
convoyeur	TC1	380	7,7
crible	CV1	380	4,6
convoyeur	TC9	380	4,1
convoyeur	TC10	380	5,5
concasseur	CM1	380	23
convoyeur	TC8	380	4,8
convoyeur	TC2	380	13,3
crible	CV2	380	9,5
convoyeur	TC11	380	7,8
convoyeur	TC12	380	4,6
broyeur	BG1	380	100
convoyeur	TC3	380	9,5
crible	CV3	380	16,5
déracineur	DER	380	5,5
convoyeur	TC5	380	7,3
convoyeur	T23B	380	4,1
déracineur	T4 (DER2)	380	4,75
convoyeur	TC4	380	6,3
roue à sable	R1	380	5,5
convoyeur	TC7	380	6,3
roue à sable	R2	380	2,4
convoyeur	TC6	380	8,5
centrale de reconstitution			
extracteur	EX1	380	4,5
extracteur	EX2	380	4,4
convoyeur	T1	380	19,2
crible	CV1	380	13,5
convoyeur	T2	380	8,3
Lavage et traitement de l'eau			
pompe à eau claire	Pompe 1	380	130
pompe à eau claire	Pompe 2	380	145
pompe à boue	Pompe à boue	380	33

Tableau 28 : Récapitulatif des consommations électriques mensuelles et leurs dépenses associées sur le site n°3

Mois	Consommation 2004 (kWh)	Consommation 2005 (kWh)	Dépenses 2004 HT (€)	Dépenses 2005 HT (€)
Janvier	5 199	12 224	689	2 207
Février	5 217	9 703	689	1 755
Mars	16 852	14 009	2 199	1 953
Avril	17 397	10 249	826	604
Mai	6 272	12 788	573	735
Juin	23 874	14 160	1 194	761
Juillet	9 536	10 566	732	715
Août	4 340	6 271	409	454
Septembre	18 714	12 256	998	656
Octobre	21 214	12 565	1 207	806
Novembre	13 094	9 505	2 001	1 811
Décembre	13 882	10 893	2 614	2 430
Total	155 591	135 189	14 131	14 887
Moyenne	12 966	11 266	1 178	1 241

• *Analyse des données collectées sur le site n°3*

Comme pour le site n°2, l'analyse du site n°3 est effectuée, en distinguant les deux types de consommations énergétiques (électricité, fioul), selon les deux approches temporelles que sont l'année et le mois.

A l'échelle annuelle, les productions 2004 et 2005, les consommations des différentes énergies ainsi que leurs proportions respectives sont illustrées dans le tableau 29. Contrairement au site n°2, entre 2004 et 2005, on observe une diminution globale des valeurs quelque soit le paramètre observé. En effet, la production est réduite de 24,3 %, les consommations globales d'électricité de 13,1 % et celles de carburant de 7,8 %. Toutefois, il est important de noter que les proportions respectives du type d'énergie sont similaires, à savoir que l'électricité représente 25 % des consommations énergétiques totales et le carburant 75 %.

Tableau 29 : Évolution annuelle de la production et des proportions respectives des consommations en électricité et en carburant sur le site n°3

	Production (tonnes)	Consommation électrique (kWh)	Consommation fioul (kWh)	Consommation totale (kWh)	% consommation électrique	% consommation fioul
2004	84 825	155 591	480 685	636 276	24,5	75,5
2005	64 233	135 189	443 056	578 245	23,4	76,6
écart 2004/2005	-24,3	-13,1	-7,8	-9,1	-4,4	1,4

Les valeurs moyennes des CESP annuelles augmentent entre 2004 et 2005 (Tableau 30) à hauteur de 14,7 % pour l'électricité et de 21,7 % pour le fioul. Cependant, on constate qu'elles restent du même ordre de grandeur, à savoir environ 2 kWh.t⁻¹ pour l'électricité et 6 kWh.t⁻¹ pour le fioul.

Tableau 30 : CESP annuelle du site n°3

	CESP électricité (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)	CESP totale (kWh.t ⁻¹)
2004	1,83	5,67	7,50
2005	2,10	6,90	9,00
écart 2004/2005 (%)	14,7	21,7	20,0

A l'échelle mensuelle, les valeurs de CESP en carburant sont tracées en figure 43. Aucune tendance significative ne peut être dégagée. En effet, les valeurs des CESP fluctuent de façon très importante d'un mois à l'autre passant du simple au triple. Par ailleurs, la très faible production du mois de février 2004 (420 t) se traduit par une valeur plus qu'inhabituelle de la CESP en fioul.

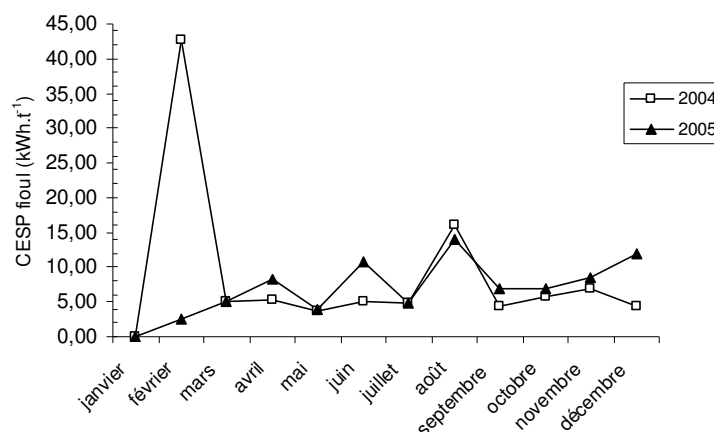


Fig. 43 : Comparaison des CESP mensuelles en carburant sur le site n°3

Les valeurs de CESP en électricité (Fig.44) restent relativement stables. En effet, la grande majorité des valeurs sont de l'ordre de 2 kWh.t⁻¹ ce qui correspond d'ailleurs à la valeur annuelle. Cependant, on constate, comme pour les valeurs de CESP en fioul (Fig.43), un pic en février 2004 se justifiant de la même manière.

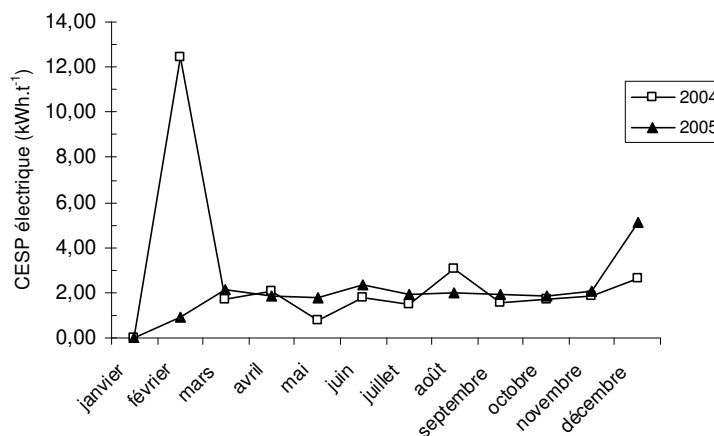


Fig. 44 : Comparaison des CESP mensuelles en électricité sur le site n°3

IV- Discussion

• *Fluctuations des CESP sur les sites n°2 et 3*

Au vu des valeurs de consommations spécifiques énergétiques présentées ci-dessus, on a procédé à la comparaison des résultats entre les sites n°2 (roches meubles) et 3 (roches meubles). La figure 45 synthétise ces données sur deux années.

Quelque soit le site considéré, les CESP en électricité sont relativement constantes dans le temps malgré quelques points extrêmes (16 % de l'ensemble). Toutefois, il est intéressant de constater que les CESP en électricité du site n°2 présentent des valeurs globalement 3 fois supérieures à celles du site n°3.

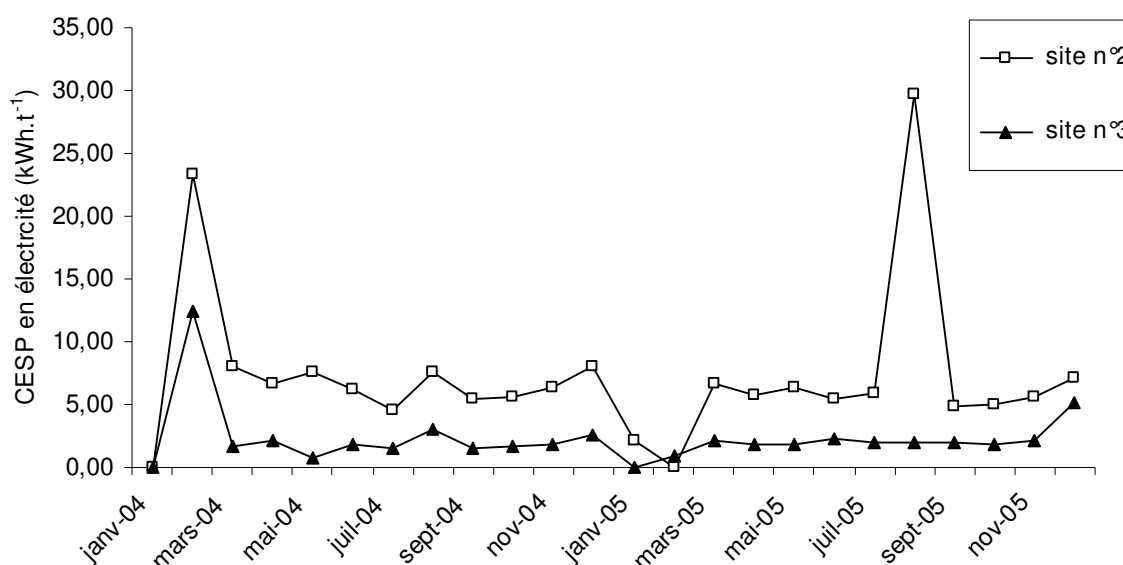


Fig. 45 : *Fluctuations des valeurs de CESP en électricité sur les sites n°2 et 3*

A l'inverse, quelque soit le site considéré, aucune tendance générale ne se dégage concernant les valeurs des CESP en fioul. De très fortes fluctuations de ces dernières sont clairement visibles au cours du temps (Fig.46). Ainsi les CESP en fioul varient entre 2,15 (octobre 2004) et 19,21 kWh.t⁻¹ (août 2005) pour le site n°2 et entre 2,56 (février 2005) et 16,18 kWh.t⁻¹ (août 2004) pour le site n°3 en négligeant le mois de février 2004. Ceci démontre bien une utilisation fluctuante des engins sur une exploitation de carrière. Une explication probable de ce phénomène est l'influence des périodes de découverte discontinues d'un point de vue temporel et/ou de réaménagement progressif du site. Par ailleurs, on constate une certaine correspondance d'évolution des courbes des deux sites mais qui ne peut pas être expliquée à ce stade avec les données obtenues.

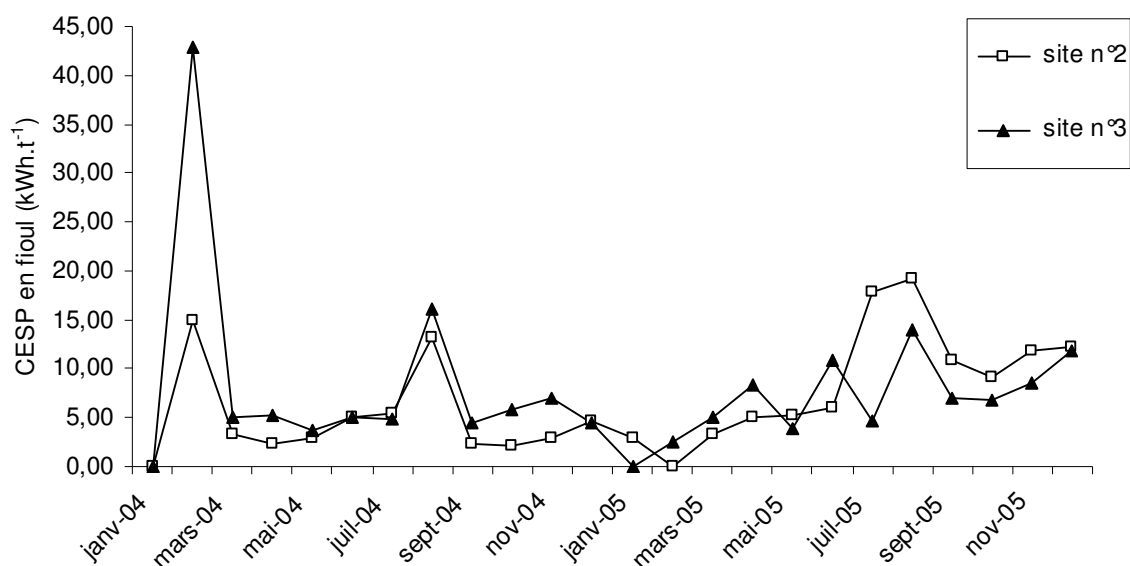


Fig. 46 : Fluctuation des valeurs de CESP en fioul sur les sites n°2 et 3

• *Choix d'indicateurs pour l'évaluation environnementale des sites*

Au vu, des données disponibles et collectées, des domaines classiquement étudiés dans les méthodes d'évaluations que sont l'ACV et l'EPE mais aussi des tendances et intérêts des populations et des industriels. On rappelle dans le tableau 31, un ensemble d'indicateurs de développement durable à prendre en considération pour les exploitations de carrière.

Un nombre limité de paramètres environnementaux a finalement été sélectionné : il s'agit des consommations énergétiques, des rejets atmosphériques et des émissions sonores. En effet, l'énergie et les rejets atmosphériques sont au cœur des préoccupations actuelles. De la même manière, les nuisances sonores sont dénoncées par une large majorité de Français comme la première gêne à laquelle ils sont confrontés dans leur vie quotidienne (ADEME). Le travail de la thèse s'est donc attaché à étudier plus particulièrement ces domaines.

Tableau 31 : Liste d'indicateurs potentiels relatifs à la ressource en granulats naturels et domaines d'études sélectionnés

Sur-classe	Classe	Sélectionnée pour ce travail	Sous-classe
Environnement	Epuisement des ressources naturelles et espace utilisé	x	produit fini
			roche extraite
			découverte
			surface utilisée
	Consommations énergétiques	x	électricité
			carburant
	Eau	x (via les consommations énergétiques)	Volume consommé
			Volume rejeté et qualité
			Quantité/qualité et devenir de boues produites
	Déchets	-	déchets mis en décharge
			déchets incinérés
			déchets recyclés
	Rejets atmosphériques	x	poussières
			engins sur site
			explosifs
	biodiversité	-	
Social	employés	-	Nombre emploi direct
			Nombre emploi indirect
			Nombre/fréquence accidents de travail
			gravité accidents de travail
	riverains	x (bruit)	Bruit
			Visuel
			Vibration
	remise en état	-	zones protégées/classées
			zones aménagées
Economie	internalisation des coûts environnementaux	-	investissements fonciers
			coûts énergétiques
			redevance eau
			traitements des déchets
			rejets atmosphériques
	internalisation des coûts sociaux	-	salaires
			dépenses pour limiter les nuisances
	investissement autres que fonciers	-	investissement engins
			installation de traitement
			entretien (engins + usine)
	Explosifs	-	selon type
	Remise en état	-	garanties financières

V- Conclusion

A partir d'une analyse de la distribution des sites de carrière sur le territoire national, l'hétérogénéité selon les départements du nombre d'exploitations, de la nature des roches exploitées et des capacités de production, a conduit à préférer une étude poussée de quelques sites. Le travail a donc porté sur des sites sélectionnés pour aborder tant les exploitations de roches massives et meubles. Il a également permis une collecte de données au niveau de l'usine d'élaboration et plus particulièrement un suivi de consommations d'énergie électrique et de combustibles fossiles. Trois sites très différents ont ainsi été retenus. Des mesures ont permis de caractériser les conditions d'élaboration des granulats au sein de l'installation de traitement. Des documents fournis par l'exploitant ont permis d'analyser les consommations énergétiques durant plusieurs années à l'échelle du mois. Un indicateur énergétique, la CESP, a été défini à cette fin et révèle une part relativement constante de consommations électriques et une part très variable des consommations de combustibles fossiles. Les mêmes types de variations des CESP ont été mis en évidence pour deux sites appartenant au même groupe, sans pour autant qu'on puisse généraliser le phénomène. Les données de base recueillies à ce stade ont conduit à envisager le développement d'un outil plutôt axé sur les consommations énergétiques, les émissions et les nuisances associées aux engins de carrière. Cet outil a été conçu de façon à être paramétrable en fonction de la nature de la roche exploitée, du nombre et du type d'engin recensés sur le site, de la composition de l'usine d'élaboration. Les fluctuations de CESP incitent également à prendre en considération la production annuelle comme base temporelle d'analyse, ce qui est cohérent avec les variations constatées dans ce chapitre à l'échelle mensuelle.

CHAPITRE III -
Modélisation environnementale de la production
de granulats naturels : Développement de l'outil CADUR
(CARrière DURable)

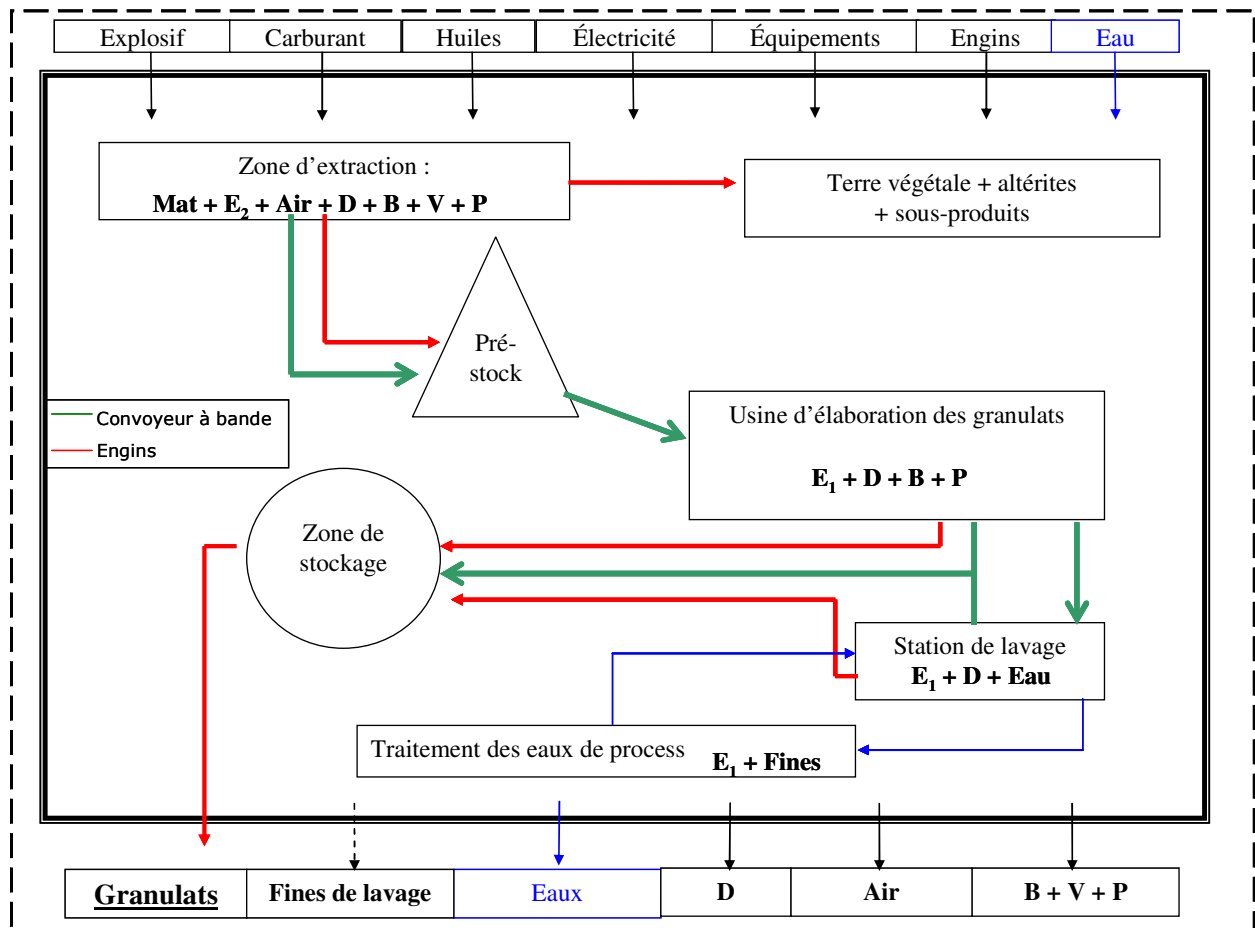
I- Introduction

Ce troisième chapitre présente la démarche de modélisation environnementale qui a été retenue à partir de l'étude des sites de carrière réalisée au chapitre II. Très tôt dans l'analyse il est apparu important de prendre en compte les deux grands types de roches afin de développer l'outil d'évaluation environnementale : les roches massives et les roches meubles qui amènent à des principes d'organisation pour l'élaboration des granulats qui sont différents. Ensuite, pour effectuer une évaluation environnementale relative à la fabrication des différentes classes granulaires produites, il s'agit de suivre les transformations subies par le matériau brut au sein de l'exploitation considérée depuis l'extraction de la roche jusqu'à constitution des stocks de produits finis. C'est cette élaboration qui est modélisée et implémentée dans un outil dont l'objet consiste à modéliser les pressions sur l'environnement liées à trois grands domaines environnementaux : l'énergie, les émissions atmosphériques et les émissions sonores. La démarche de modélisation adoptée est tout d'abord présentée suivie par une description détaillée de chaque modèle développé. A l'issue de cette description, l'outil en lui-même, nommé CADUR (pour CARrière DURable), est présenté afin de montrer les différentes possibilités qu'il offre à l'utilisateur.

II- Démarche de modélisation

II.1- Modèle global des sites de carrières

Ce modèle global est en fait fondé sur l'analyse du site de carrière et des transformations de matière qui s'y déroulent. A ce stade c'est l'ACV qui est plutôt utilisée comme cadre de travail. Au sens de cette dernière, une exploitation de carrière peut être considérée comme un système, délimité par ses frontières. La figure 47 illustre ce principe et présente quelques exemples de flux pouvant intervenir sur une exploitation de carrière. En effet, la liste des différents entrants et sortants ne serait être exhaustive compte tenu de leur nombre et de leur complexité selon le type d'exploitation considérée et la configuration de cette dernière. Sur ce schéma, les différents postes typiques d'une carrière sont représentés par un rectangle. Au cours de leur élaboration, les granulats vont être véhiculés, entre ces différents postes, de façon continue lors de l'utilisation de convoyeurs à bandes (flèches vertes) ou bien discontinue lors de l'utilisation d'engins de transport (flèches rouges). Ces flux entrants dans le système vont générer différentes pressions quelque soit le poste considéré. A titre d'exemple, au niveau de la zone d'extraction, les différents engins utilisés vont consommer de l'énergie sous forme de carburant, être source d'émissions vers l'atmosphère (rejets de combustion, envol de poussière et bruit) mais aussi produire des déchets tels que les huiles de vidange ou bien encore les pneumatiques usagés.



Légende :

Mat, matière première = roche ; E1, énergie sous forme électrique ; E2, énergie sous forme de carburant ; Air, émissions atmosphériques ; D, déchets ; B, bruit ; V, vibration ; P, poussière ; Eau, volume d'eau ; Fines, fines de décantation des eaux de traitement ;

—> Circuit d'eau de lavage des granulats ; ———, Périmètre de l'exploitation ; , Milieu extérieur.

Fig. 47 : Schématisation d'une exploitation de carrière au sens de l'Analyse Cycle de Vie

II.2- Cahier des charges de l'outil d'évaluation environnementale CADUR

L'outil développé a pour objet l'évaluation dans différents domaines d'études d'une part des produits vendus par l'exploitant et d'autre part de la gestion du parc d'équipements de la carrière. Les indicateurs et les flux traités au cours de ce travail, définis de manière détaillée à l'échelle de chaque engin et équipement constitutifs de l'installation, incluent l'extraction, le transport, l'élaboration et le lavage. Par ailleurs, l'outil est basé sur la production d'une masse de granulat au cours d'une période de référence. Ces deux données sont paramétrables et librement fixées par l'utilisateur. La structure générale de l'outil est illustrée en figure 48.

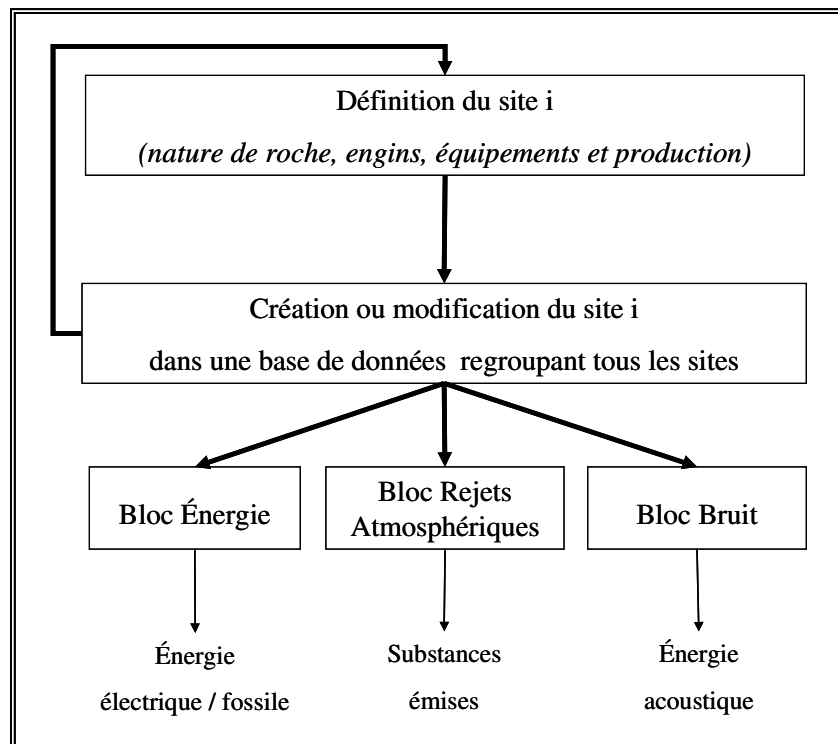


Fig. 48 : Structure générale de l'outil CADUR

Comme le montre la figure 48, la logique de travail adoptée est une approche site, ce qui constitue le point clé du cahier des charges développé. Partant de cette logique de site, les fonctionnalités de l'outil sont définies de manière à :

- évaluer la production des granulats par classe granulométrique, et produire un bilan environnemental par classe granulaire,
- simuler l'incidence d'une modification d'organisation (changement d'engin, changement de tâche d'engins, changement d'un type d'équipement) sur le bilan environnemental,
- aider à la conception d'une exploitation de carrière à insérer dans un territoire en paramétrant les choix des matériels afin de prendre en compte les nuisances acoustiques, ainsi que des économies d'énergies et une "optimisation" des rejets à l'atmosphère.

D'autre part, la logique d'organisation générale d'une carrière a conduit à décomposer l'outil selon différents blocs de calcul liés à :

- l'extraction, qui comprend les transports jusqu'à l'usine d'élaboration,
- l'élaboration, qui englobe l'ensemble des équipements (concasseurs, cribles, convoyeurs à bandes, ...) agencés en ligne de production,
- le déstockage et le chargement client, qui inclut le transport sortie d'usine,
- d'autres postes, parmi lesquels l'arrosage des pistes afin d'éviter l'envol des poussières.

II.3- Collecte de données nécessaires aux différents modèles de l'outil CADUR

Afin de répondre au cahier des charges, un certain nombre de données doivent être renseignées pour les sites à étudier. Les sources de données sont multiples et diverses. Le tableau 32 regroupe les différentes origines de ces paramètres d'entrée et le(s) modèle(s) nécessitant leurs utilisations.

Tableau 32 : Sources des données nécessaires à l'utilisation de l'outil CADUR

Données	Sources des données			Modèle
	Réglementation	Exploitant	Fabricant	
Production		x		Énergie Rejets atmosphériques
Durée		x		Énergie Rejets atmosphériques Bruit
Engins de carrière	x	x		Énergie Rejets atmosphériques Bruit
Équipements		x		Énergie Rejets atmosphériques
Explosifs		x	x	Rejets atmosphériques

III- Modélisation par domaine

Sur la base de ce cahier des charges visant à développer un outil dédié aux exploitations de carrières, ce dernier comporte trois modèles appliqués différents, en l'occurrence, on désigne des modèles dans la suite comme : modèle Consommations énergétiques, modèle Rejets atmosphériques et modèle Bruit. La figure 49 présente pour chacun des modèles, la (ou les) discipline(s) concernée(s), la (ou les) différent(s) type(s) de sources ainsi que la (ou les) unité(s) de sortie.

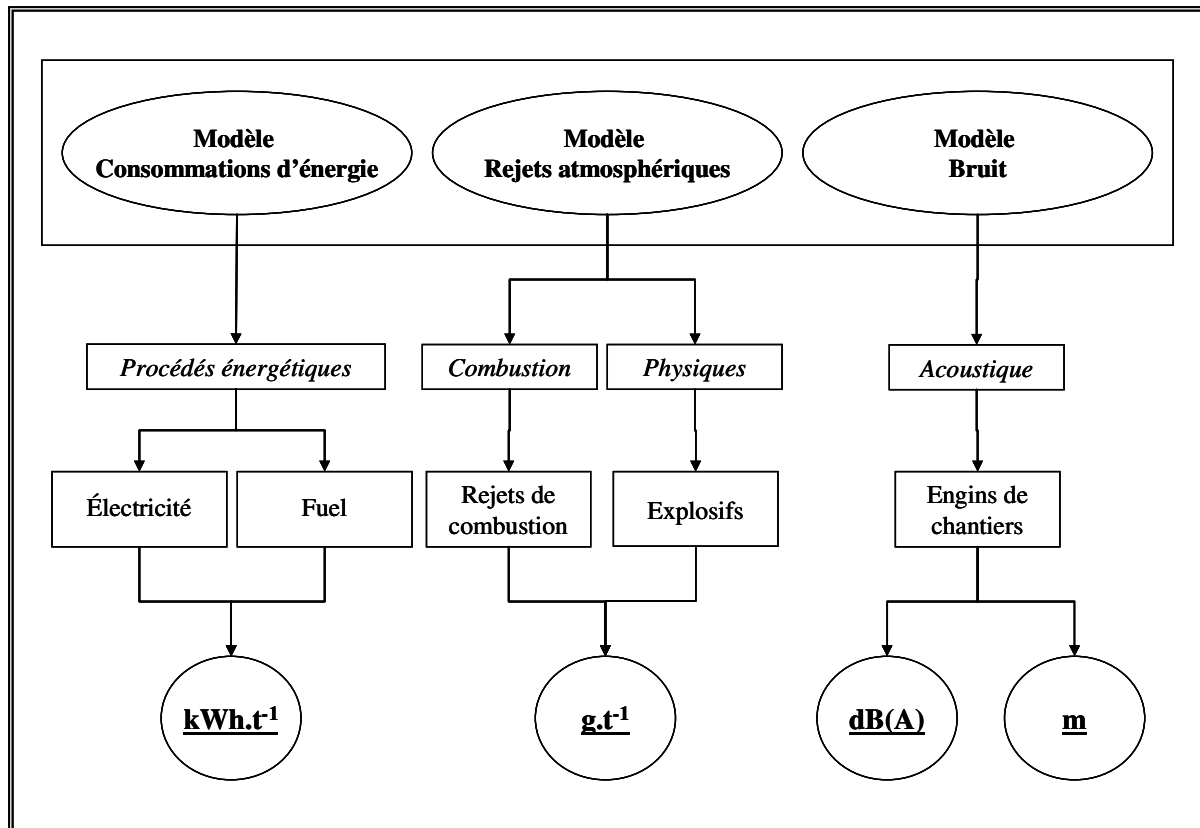


Fig. 49 : Modèles développés dans l'outil CADUR

III.1- Consommations énergétiques

Les consommations énergétiques générées sur une exploitation de carrière proviennent de deux sources distinctes ; chacune d'entre elle utilisant une énergie de nature différente. Ainsi, le fioul est nécessaire au bon fonctionnement des différents engins de carrières alors que différents équipements, tels que les concasseurs, les cribles ou bien encore les convoyeurs à bandes, sont consommateurs d'énergie électrique. Dans ce travail, l'ensemble de ces points de consommation est analysé séparément et de façon détaillée.

III.1.1- Modélisation des consommations d'énergie électrique

Selon le type et la configuration de l'exploitation considérée, les demandes énergétiques en électricité peuvent être associées à 3 postes ; à savoir l'usine de traitement et d'élaboration des granulats, la centrale de recomposition et le transport (lors de l'utilisation de convoyeurs à bandes) entre la zone d'extraction et la zone d'élaboration. L'objectif de la mise au point du modèle appliqué aux carrières consiste à fournir une indication, la plus précise possible, sur les besoins de production en électricité, par classe granulaire. La figure 50 illustre la méthode employée pour y parvenir.

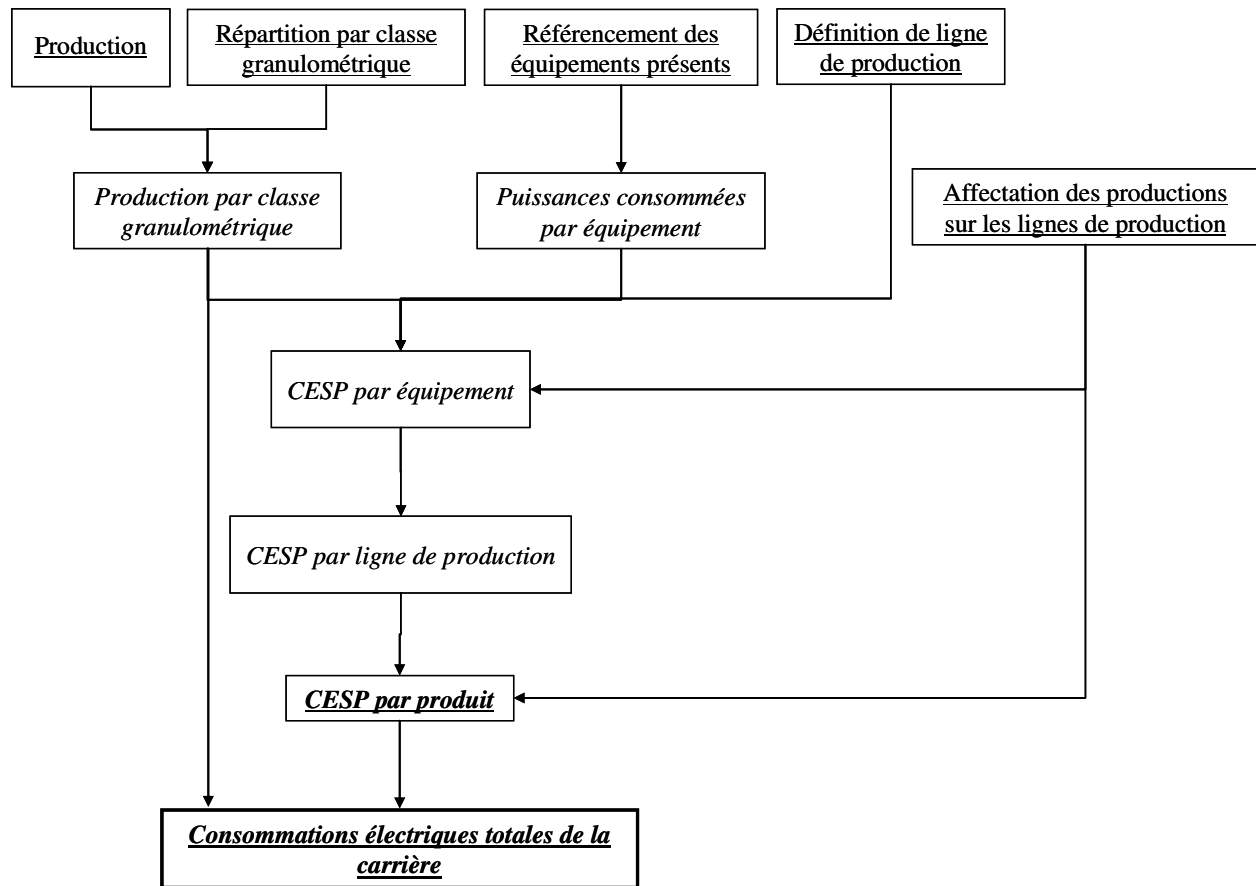


Fig. 50 : Organisation générale des calculs de besoins électriques de CADUR

Dans l'optique d'écrire les équations bilan qui régissent les consommations électriques au sein de chaque équipement, deux types de données sont indispensables ; il s'agit des quantités d'électricité consommées par chacun des équipements et des quantités de matériaux passant au sein de chaque équipement.

Les consommations peuvent être obtenues par mesures directes, au niveau de la centrale électrique de l'exploitation, de l'intensité traversant chaque équipement. Dans un système triphasé, les puissances consommées peuvent être déterminées grâce à la formule suivante (Wikipedia) :

$$P = T \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} \cdot I \quad (8)$$

avec : T, la tension (V) ; $\cos \varphi$, le facteur de puissance (sans dimension) et I, l'intensité (A).

Les quantités de matériaux sont gérées dans le modèle grâce à la notion de ligne de production au travers de laquelle les granulats sont progressivement élaborés. Cette notion correspond dans la suite du document, à un certain nombre d'équipements composant un chemin permettant en sortie de ligne de produire un matériau de classe granulométrique connue ; chaque équipement peut être affecté sur une ou plusieurs lignes de production.

A titre d'exemple et pour préciser le propos, cinq équipements (un concasseur et 4 cribles) sont recensés au sein d'un site à étudier. L'exploitant définit trois lignes de productions potentielles à partir du synoptique de l'exploitation. Les équipements composant chacune de ces lignes de production sont définis dans le tableau 33. Les cribles sont repérés par leur numéro CV_i et le concasseur par CG1. Par ailleurs, comme le montre cet exemple, une classe granulométrique (d/D, e/E) peut être produite par une ou plusieurs lignes de production.

Tableau 33 : Exemple de composition des lignes de production

	Ligne de production n°1	Ligne de production n°2	Ligne de production n°3
Equipements	CG1	CG1	CG1
	CV1	CV2	CV1
	CV3	CV4	CV4
Granulats	d/D et e/E	d/D	e/E

Une fois les lignes de production définies, les quantités de matériaux passant au sein de chaque équipement peuvent être déterminées. Le concasseur CG1 apparaît dans la composition de chaque ligne de production ; la masse de matériaux traversant cet équipement est obtenue en sommant les quantités de matériaux produits à partir des trois lignes de production définies. Le tableau 34 illustre ainsi le mode d'affectation des flux de matière par équipement.

Tableau 34 : Quantités de matériaux traversant chaque équipement

Masse CG1	Masse CV1	Masse CV2	Masse CV3	Masse CV4
Masse Ligne 1 + Masse Ligne 2 + Masse Ligne 3	Masse Ligne 1 + Masse Ligne 3	Masse Ligne 2	Masse Ligne 1	Masse Ligne 2 + Masse Ligne 3

Les masses par ligne de production (Masse Ligne 1 à 3) sont quant à elles, obtenues à partir des paramètres d'entrée de production connues de l'exploitant. Ainsi, sur les 60 000 tonnes produites par l'exploitation, 9 600 sont issues de la ligne de production n°1, 28 800 par la ligne n°2 et 21 600 t par la ligne n°3. Le tableau 35 récapitule, à partir du tonnage produit, le cheminement complet conduisant au calcul des masses par ligne de production.

Tableau 35 : Paramètres permettant la détermination des masses par ligne de production

Production totale (t)	Gamme de granulats		Ligne de production		
60 000 en x jours sur y heures par jour	60 %	d/D	Ligne 1	20 %	7 200 t
			Ligne 2	80 %	28 800 t
	40 %	e/E	Ligne 1	10 %	2 400 t
			Ligne 3	90 %	21 600 t

Ainsi, la consommation spécifique de chacun des équipements ($CESP_{eq}$) présents au sein de l'installation peut être déterminée en ramenant la puissance consommée par l'équipement considéré à la quantité horaire passant dans cet équipement comme décrit par l'équation 9.

$$CESP_{eq} = \frac{380 \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot 0,81 \cdot x \cdot y}{Q} \quad (9)$$

avec : 380, la tension en V ; 0.81, le facteur de puissance ($\cos \varphi$) ; I , l'intensité mesurée (A), x , le nombre de jours de production ; y , le nombre d'heures moyen travaillées par jour et Q , la production (t).

Une fois la valeur de consommation par équipement obtenue, le modèle détermine la consommation spécifique par ligne de production ($CESP_{ligne}$) en appliquant la formule suivante :

$$CESP_{ligne_i} = \sum_{j=1}^n (CESP_j \cdot \%) \quad (10)$$

avec : $CESP_j$, la consommation spécifique de l'équipement j qui appartient à la ligne i

Ensuite, l'outil impute à chaque produit une valeur de consommation électrique spécifique ($CESP_{d/D}$) par l'expression suivante :

$$CESP_{d/D} = \sum_{i=0}^n (CESP_{ligne_i} \cdot \%_{d/D \text{ ligne}_i}) \quad (11)$$

avec : $CESP_{ligne_i}$, la consommation spécifique de la ligne de production i ; $\%_{d/D \text{ ligne}_i}$, la proportion de la fraction d/D produite par la ligne i (tableau 35).

La quantité d'électricité globale nécessaire à la production totale de l'exploitation de carrière considérée est ensuite obtenue par la formule suivante :

$$E = \sum_{i=0}^n CESP_i \cdot Q_i \quad (12)$$

avec : E_i , la consommation spécifique nécessaire du produit i et Q_i , sa production.

III.1.2- Modélisation des consommations d'énergie fossile

Les consommations de carburant, et plus précisément en fioul, sont engendrées par les différents engins présents au sein de l'exploitation de carrière. En ramenant la consommation respective de chaque engin aux productions de l'exploitation, il est alors possible de déterminer les besoins en carburant, en kWh, pour élaborer une tonne de granulat à partir de la formule suivante :

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot h_i \cdot j \cdot 9,91}{Q} \quad (13)$$

avec : C_i , la consommation de l'engin i ($l \cdot h^{-1}$) ; h_i , le nombre moyen d'heures quotidienne de fonctionnement ; j , le nombre de jour de fonctionnement ; 9,91, le pouvoir calorifique du fioul ($kWh \cdot l^{-1}$) (CITEPA/CORALIE, 2006) et Q , la production (t)

III.2- Émissions atmosphériques

Les émissions retenues dans le modèle sont celles générées par les activités spécifiques à l'élaboration des granulats, en l'occurrence les tirs d'abattage et l'utilisation des engins de carrière.

III.2.1- Émissions générées lors des tirs d'abattage

Les rejets dégagés lors de l'explosion vont dépendre du type et de la quantité d'explosif utilisé. Ils seront donc variables d'un tir à l'autre. L'objectif étant de quantifier la nature et les volumes des gaz dégagés pour fabriquer une tonne de granulats, cette opération devrait être répétée sur un nombre de tirs important.

En effet, plusieurs facteurs vont influencer l'exploitant quant aux choix des explosifs utilisés (nature et quantités) : les conditions météorologiques (notamment la présence ou non d'eau dans les trous de forages), le volume théorique de roche abattue souhaité (nombre de rangées et de trous par rangées), etc... Cependant, un plan de tir « classique » est toutefois défini pour chaque exploitation ; celui-ci peut être considéré comme représentatif des tirs d'abattage réalisés sur l'exploitation.

La quantité E_i de gaz i (en g.t^{-1}) de détonation dégagée par tonne de roche peut être déterminée en appliquant de la formule suivante :

$$E_i = \frac{e_i \cdot M_i \cdot S}{Q} \quad (14)$$

avec : e_i , facteurs d'émissions de rejet i ($\text{mol.kg}_{\text{explosif}}^{-1}$) ; M_i , la masse molaire du gaz i (g.mol^{-1}) ; S , la quantité d'explosif utilisée ($\text{kg}_{\text{explosif}}$) ; Q , production (t)

Les informations relatives à l'explosion (type d'explosif, plans de tirs...) sont connues de l'exploitant. Concernant les facteurs unitaires des volumes de gaz dégagés ainsi que leurs compositions théoriques (car obtenues lors d'essais en laboratoire), pris en compte dans le modèle, sont représentés dans le tableau 36. Malheureusement, seul un fabricant d'explosifs nous a fourni les valeurs concernant leurs explosifs (hors dynamites).

Tableau 36 : Composition idéale théorique des gaz de détonation

	Type d'explosif				
	Dynamites	Émulsions		Nitrate-fuel	
	Dynaroc 9A	Nitram 5	Nitram 9	Nitro D8	Nitral
	moles.kg ⁻¹				
CO ₂	NC	3,567	2,408	3,785	2,695
H ₂ O		25,646	25,501	27,685	25,625
N ₂		9,417	8,822	11,792	11,320
NO		0,000	0,000	0,010	0,093
O ₂		0,000	0,000	0,002	0,042
NH ₃		0,127	0,346	0,040	0,003
H ₂		0,834	2,247	0,148	0,167
CO		0,587	1,494	0,129	0,130
Oxydes d'aluminium		0,518	1,446	0,000	0,927

III.2.2- Émissions générées par la combustion de carburant

Outre l'impact sur l'épuisement des ressources pétrolières, il convient également de prendre en considération la contribution du transport à la pollution atmosphérique en évaluant les rejets d'échappement des engins présents sur les exploitations de carrière.

Sous des conditions idéales, une combustion complète de matière carbonée n'aurait pour résultante que la formation de CO₂ (Mitra *et al.*, 2002). Une combustion incomplète a lieu lorsque la quantité d'oxygène ne peut permettre au combustible de réagir complètement avec le dioxygène. Ainsi, quand un hydrocarbure brûle dans l'air, la réaction produira du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone, mais aussi de nombreux autres composés tels que les oxydes d'azote.

Lorsqu'elle n'est pas mesurée, l'évaluation des rejets des moteurs d'engins de chantiers peut être basée sur la consommation en carburant des engins, sachant que ces paramètres sont reliés selon le type de carburant consommé, le type et la puissance des engins, l'âge du moteur... Les émissions des engins de carrière sont basées sur différents facteurs d'émissions des véhicules de travaux publics (Tableau 37). Ainsi, les facteurs pris en compte dans les calculs sont les valeurs limites d'émissions proposées par la réglementation européenne (Directive, 1997 et 2004) (EMEP/CORINAIR, 2003) et pour les moteurs fabriqués avant 1999, les valeurs limites d'émissions proposées par l'U.S. Environmental Protection Agency (Beardsley et Lindhjem, 1998). Toutefois, les facteurs unitaires des différents métaux lourds considérés, de N₂O, de NH₃, de CH₄ et des Polluants Organiques Persistants n'ont été trouvés que pour les stages I et II. Cependant, vu que ces derniers restent constants tout au long de ces stages, les mêmes valeurs ont été appliquées quelque soit l'année de l'engin considéré.

Tableau 37 : Facteurs unitaires des émissions atmosphériques pris pour le modèle

Période (Stage)	Puissance (kW)	Facteur unitaire (g.kWh ⁻¹)							Facteur unitaire (mg. kg _{fuel} ⁻¹)						
		CO	COVNM	NO _x	PM	N ₂ O	CH ₄	NH ₃	POP	Cadmium	Cuivre	Chrome	Nickel	Selenium	Zinc
1988-1999	37-75	4,68	1,33	11,13	0,97	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	75-130	3,62	0,91	11,24	0,54	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	130-560	3,62	0,91	11,24	0,54	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	>560	3,62	0,91	11,24	0,54	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
I (1999)	37-75	6,5	1,3	9,2	0,85	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	75-130	5	1,3	9,2	0,7	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	130-560	5	1,3	9,2	0,54	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
II (2000/2005)	18-37	5,5	1,5	8	0,8	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	37-75	5	1,3	7	0,4	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	75-130	5	1	6	0,3	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	130-560	3,5	1	6	0,2	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
III A (2006/2010)	19-37	5,5	7,5		0,6	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	37-75	5	4,7		0,4	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	75-130	5	4		0,3	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	130-560	3,5	4		0,2	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
III B (2011/2013)	37-56	5	4,7		0,025	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	56-75	5	0,19	3,3	0,025	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	75-130	5	0,19	3,3	0,025	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	130-560	3,5	0,19	2	0,025	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
IV (>=2014)	56-130	5	0,19	0,4	0,025	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
	130-560	3,5	0,19	0,4	0,025	0,35	0,05	0,002	3,32	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1

De plus, l'Agence de Protection de l'Environnement Américaine précise que 97,5 % de particules émises par les engins sont de diamètre inférieur à 2.5 µm (EPA, 2004). La figure 51 illustre le principe général des calculs des rejets atmosphériques appliqués dans le modèle.

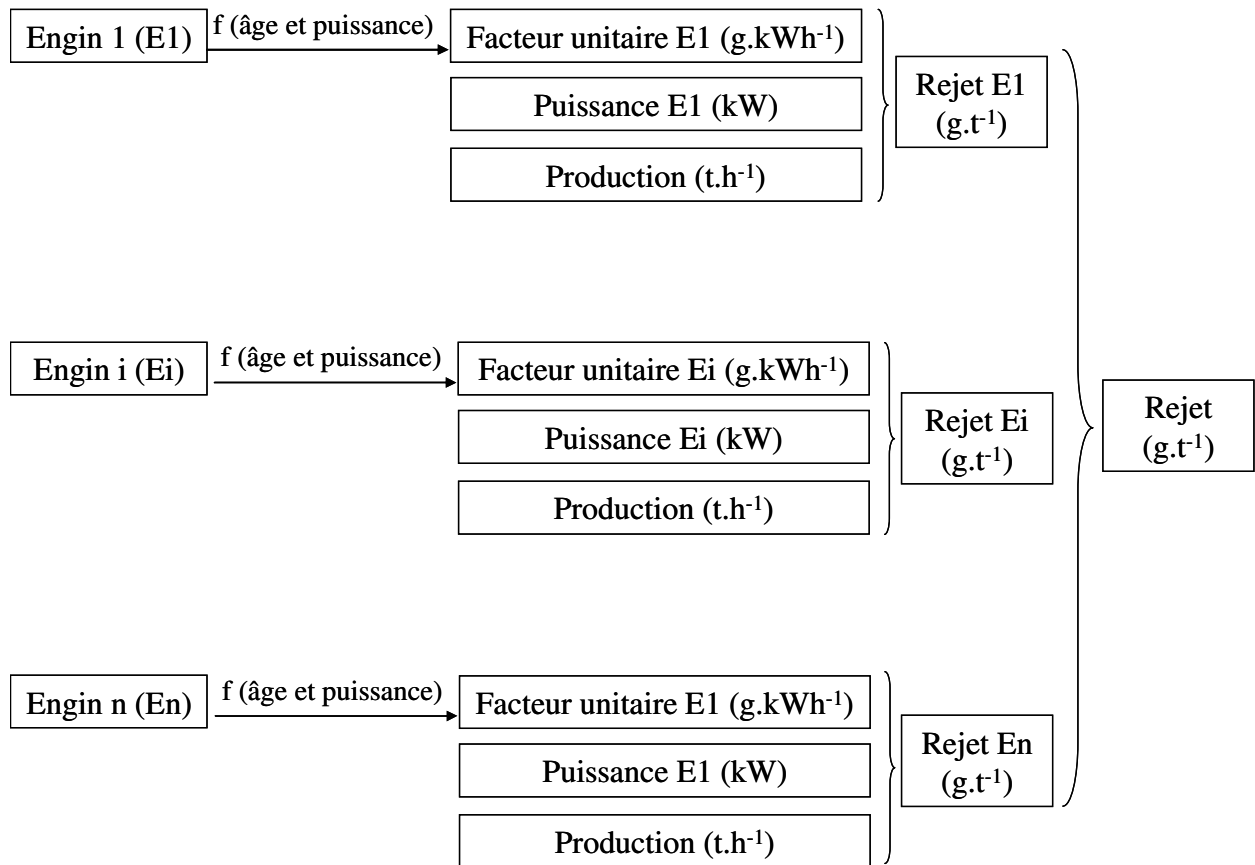


Fig. 51 : Principe d'évaluation des rejets atmosphériques générés par les engins de chantiers (hors CO₂ et SO₂)

Les émissions de chaque polluant considéré (E_j en g.t⁻¹) peuvent être déterminées par l'expression suivante :

$$E_{ji} = \frac{F_{ji} \cdot P_i}{Q} \quad (15)$$

avec : F_{ij} , facteur d'émission du gaz j qui est fonction de l'année de fabrication du moteur de l'engin i et de sa puissance (g.kWh⁻¹) ; P_i , puissance de l'engin i (kW) et Q , production de granulats horaire (t.h⁻¹)

Les émissions de SO₂ (g.t⁻¹) et de CO₂ (g.t⁻¹) peuvent, quand à elles, être appréciées directement à partir de la consommation en carburant. Beardsley M. et Lindhjem C. (Beardsley et Lindhjem, 1998) proposent la méthode de calcul suivante :

$$SO_{2i} = \frac{(C_i \cdot a \cdot b \cdot c - COVNM) \cdot P_i}{Q} \quad (16)$$

avec : C_i , consommation en carburant (g.kWh⁻¹) ; a , ajustement correspondant à la partie du soufre qui va être émis sous forme de particules = 1 - 0,022 ; $COVNM$, facteur d'émission (g.kWh⁻¹) ; b , valeur par défaut du soufre dans le diesel = 0,0033 ; c , nombre de grammes de SO₂ formé à partir d'un gramme de soufre = 2 ; P_i , puissance de l'engin (kW) et Q : production de granulats horaire (t.h⁻¹)

Connaissant la consommation de l'engin, Beardsley M. et Lindhjem C. (Beardsley et Lindhjem, 1998) détermine les émissions de CO₂, en émettant l'hypothèse que tout le carbone contenu dans le fioul consommé va être émis sous forme de CO₂.

$$CO_{2i} = \frac{0,87 \cdot \frac{44}{12} \cdot C_i \cdot (0,85 \cdot 1000)}{Q} \quad (17)$$

avec : 0,87, teneur massique en carbone dans le gasoil ; C_i , consommation en carburant (l.h⁻¹) ; 44, masse moléculaire du CO₂ ; 12, masse molaire du C ; 0,85, densité du FOD en kg.l⁻¹ et Q (t.h⁻¹.) production horaire de granulat

Cependant, une combustion n'étant jamais efficace à 100 %, les valeurs ainsi obtenues pour ce polluant doivent être soustraites des résultats de CO, COVNM et CH₄. Ainsi, les quantités de CO₂ émis par chaque engin i sont estimées grâce à la formule suivante :

$$CO_{2i} = \left(\frac{0,87 \cdot \frac{44}{12} \cdot C_i \cdot (0,85 \cdot 1000)}{Q} \right) - CO_i - COVNM_i - CH_{4i} \quad (18)$$

avec : 0,87, teneur massique en carbone dans le gasoil ; C_i , consommation en carburant (l.h⁻¹) ; 44, masse moléculaire du CO₂ ; 12, masse molaire du C ; 0,85, densité du FOD en kg.l⁻¹ ; Q (t.h⁻¹.), production horaire de granulat et CO_i , $COVNM_i$ et CH_{4i} , rejets de CO, COVNM et CH₄ de l'engin i estimés à partir de l'équation 15.

De plus, un dernier facteur est à prendre en compte ; il s'agit du nombre d'heure de fonctionnement de chaque engin considéré. En effet, si les tombereaux approvisionnent entre la zone d'extraction et la zone d'élaboration de façon quasi continue, d'autres engins tels que la foreuse, par exemple, ne sont utilisés que ponctuellement. Ainsi, quelque soit l'émission considérée, les émissions déterminées à partir des équations sus-citées doivent être corrigées. L'équation suivante définit ce facteur de correction :

$$E_{ji} = E_{ji0} \cdot \frac{a}{b} \quad (19)$$

avec : E_{ji0} , émission du gaz j non corrigée de l'engin i ; a , le nombre d'heure de fonctionnement de l'engin i et b , le nombre moyen d'heures journalières de production.

Ainsi, les quantités de gaz j émises par les engins sur l'ensemble de l'exploitation considérée et ramenées à la tonne de granulats produites peuvent être estimées en sommant les quantités rejetées par chaque engin recensé.

III.3- Approches théoriques des émissions sonores

III.3.1- Propagation du bruit

Une fois émis par la source, le bruit va se propager dans le milieu environnant. Différents paramètres ou phénomènes peuvent interagir sur cette propagation, en l'occurrence, le type de source, les conditions météorologiques, la présence ou non de sol, l'existence d'obstacle. Chacun de point va être abordée dans ce paragraphe.

III.3.1.1- différents types de sources

Il convient de distinguer deux grands types de sources : les sources ponctuelles (source unitaire, source dite omnidirectionnelle) et les sources linéiques (source allongée en une direction : tuyau, un flot de trafic continu...) (Fig. 52).

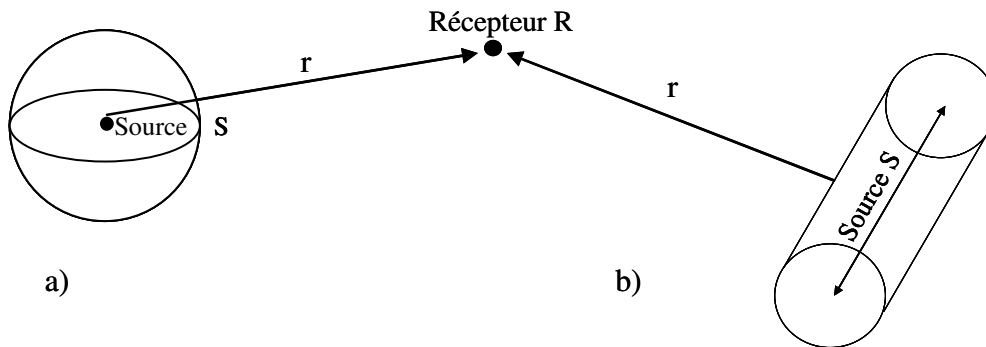


Fig. 52 : Sources ponctuelles (a) et sources linéiques (b)

La pression acoustique, à une distance r , générée par une source est de la forme suivante :

$$p^2 = \frac{W}{x} \cdot Q \cdot \rho_0 \cdot c \quad (20)$$

avec : Q , coefficient de directivité ; x , variable fonction du type de source ($4 \cdot \pi \cdot r^2$ pour une source ponctuelle et $4 \cdot \pi \cdot r$ pour une source linéique) ; ρ_0 , la masse volumique de l'air au repos et c , la célérité du son dans l'air.

III.3.1.2- incidences des conditions météorologiques

La célérité du son dans l'air, c'est-à-dire la vitesse à laquelle les perturbations se propagent, dépend de la pression atmosphérique p_0 et de la masse spécifique de l'air ρ_0 .

$$c = \sqrt{\frac{1,4 \cdot p_0}{\rho_0}} \quad (\text{Formule de Laplace}) \quad (21)$$

Or, la masse spécifique de l'air dépend de la température : à 25°C et sous une pression de $1,013 \cdot 10^5$ Pa, ρ_0 vaut $1,18 \text{ kg.m}^{-3}$ à 25°C ; on déduit une valeur de c égale à 345 m.s^{-1} . Aux températures ambiantes usuelles, on a approximativement $c = 20,08 \cdot \sqrt{T(K)}$ (Notions d'acoustique – R. JOSSE (Ed. Eyrolles, 1972) in CETUR, 1980).

Par ailleurs, les effets, à des températures variables, de l'humidité relative sur la vitesse de propagation des ondes sonores, dans l'air, peuvent être calculés grâce à l'équation suivante (Wong et Embleton, 1985) :

$$\frac{c_h}{c_0} = 1 + h.(9,66.10^{-4} + 7,2.10^{-2}.t + 1,8.10^{-6}.t^2 + 7,2.10^{-8}.t^3 + 6,5.10^{-11}.t^4) \quad (22)$$

avec : c_h , c_0 , vitesse du son dans l'air respectivement humide et sec ; h , humidité relative ; t , température en Celsius

Ainsi et comme le montre la figure 53, l'accroissement de l'humidité relative de l'air se traduira par une augmentation de la célérité du son dans l'air, exception faite pour des valeurs d'humidité relative inférieure à 14 % (Harris, 1971).

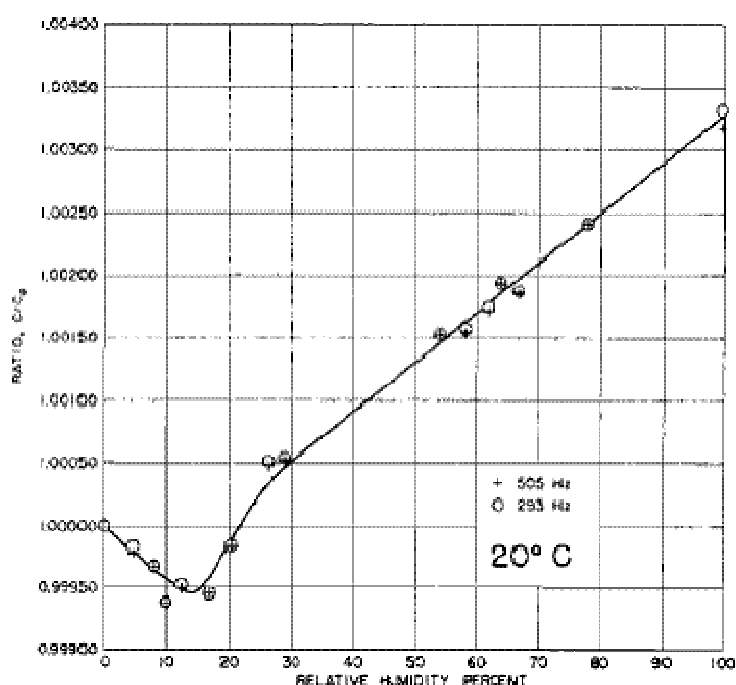


Fig. 53 : Relation vitesse du son dans l'air / l'humidité relative de l'air (Harris, 1971)

Par ailleurs, la norme ISO 9613-1 (AFNOR, 1993) propose une méthode de calcul de l'absorption atmosphérique en fonction de la température et du taux d'humidité relative. Ainsi, la pression acoustique, à une distance r de la source et en ne considérant que l'effet de l'absorption atmosphérique, peut être définie à partir de la formule suivante :

$$p_r = p_{r=0} \cdot e^{-0.1151 \cdot \alpha \cdot r} \quad (23)$$

La valeur α correspond au coefficient d'atténuation qui est fonction à la fois du taux d'humidité relative, de la température et de la fréquence considérée (Fig.54).

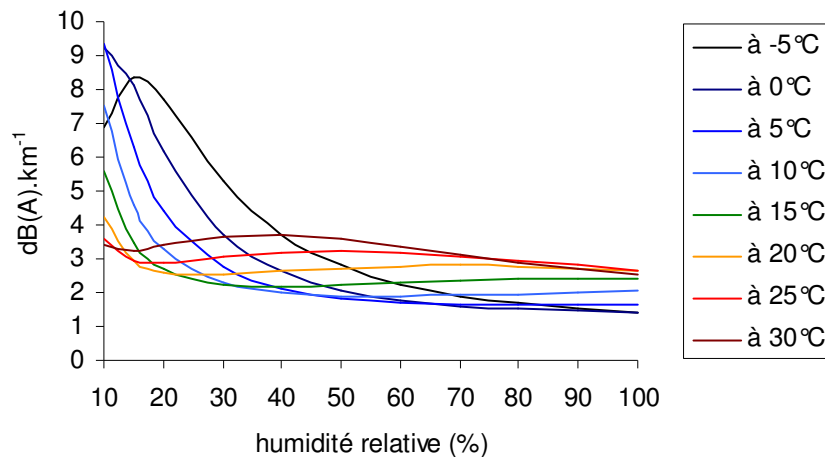


Fig. 54 : Valeur d'atténuation en dB(A) par kilomètre, à la fréquence de 500 Hz
d'après AFNOR, 1993

Enfin, il est reconnu que l'influence du vent sur la propagation des ondes sonores est très certainement importante pour des distances supérieures à 200 mètres (CETUR, 1980). L'origine de cette forte influence s'explique par le fait qu'en terrain plat, sans turbulences, la vitesse du vent ainsi que la température de l'air sont fonction de l'altitude : en effet, on observe un gradient positif de la vitesse du vent et classiquement (car il existe des phénomènes d'inversion) un gradient négatif de la température. L'existence de ces gradients s'explique par la stratification horizontale de l'atmosphère (chaque couche étant isotherme et animée d'une même vitesse horizontale). Cette dernière a pour effet de réfracter les ondes sonores.

D'une façon qualitative, un vent portant provoque une courbure des rayons vers le sol générant ainsi une augmentation du niveau de pression acoustique ; inversement, un vent contraire engendrera une courbure des rayons vers le ciel, d'où une diminution du niveau et la création d'une zone d'ombre acoustique (Premat, 2000) (Fig.55). En milieu dégagé, ce phénomène peut expliquer des différences de plusieurs décibels entre les résultats théoriques et les niveaux réellement mesurés in situ.

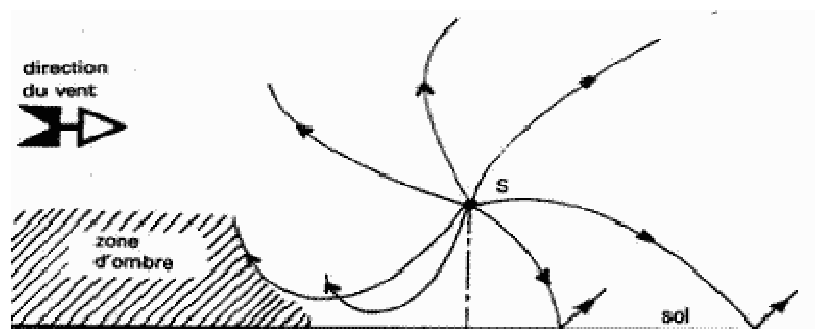


Fig. 55 : l'effet du vent (d'après CETUR, 1980)

III.3.1.3- présence ou absence de sol

- propagation en champ libre : phénomène de divergence géométrique

Lors d'une propagation en champ libre, le coefficient de directivité Q est égal à 1. Ainsi, pour une source ponctuelle isotrope de pression acoustique p qui émet dans toutes les directions de l'espace, la puissance acoustique W , à la distance r , peut être estimée à partir de la formule suivante (CETUR, 1980) :

$$W = \frac{p^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2}{\rho_0 \cdot c} \quad (24)$$

Sachant que $W_0 = \frac{p_0^2}{\rho_0 \cdot c}$, le niveau de puissance (L_w) acoustique peut alors s'écrire :

$$L_w = 10 \cdot \log\left(\frac{p^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2}{p_0^2}\right) \quad (25)$$

$$L_w = L_p + 10 \cdot \log(r^2) + 11 \quad (26)$$

avec : L_p , le niveau de pression acoustique et r , la distance entre la source et l'émetteur

Pour une source linéique, les surfaces d'ondes ne sont plus sphériques comme dans le cas d'une source ponctuelle, mais cylindriques. Dans ce cas, la puissance acoustique à la distance r s'écrit (CETUR, 1980) :

$$W = \frac{p^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot r}{\rho_0 \cdot c} \quad (27)$$

Et le niveau de puissance acoustique L_w peut alors s'écrire :

$$L_w = L_p + 10 \log r + 11 \quad (28)$$

- propagation en présence de sol

Lorsque la source repose sur une surface, un sol, les émissions sonores générées ne vont alors plus se propager dans toutes les directions de l'espace ($Q = 2$) mais dans un demi-cercle pour les sources ponctuelles et dans un demi-cylindre pour les sources linéiques. Selon la capacité du sol à absorber ou à réfléchir les ondes sonores, la puissance de l'onde sera plus ou moins élevée.

Dans le cas où la source repose sur un sol réfléchissant, les relations de puissance acoustique et de niveau de puissance acoustique deviennent la suivante :

$$\text{Ainsi, pour les sources ponctuelles : } W = \frac{p^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2}{\rho_0 \cdot c} \Rightarrow L_w = L_p + 10 \log(r^2) + 8 \quad (29)$$

$$\text{Et pour les sources linéiques : } W = \frac{p^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}{\rho_0 \cdot c} \Rightarrow L_w = L_p + 10 \log r + 8 \quad (30)$$

Les propriétés d'absorption acoustique des sols sont essentiellement liées à leur porosité. Les sols compacts sont généralement réfléchissants et les sols poreux absorbants (CERTU, 1997). La valeur de l'atténuation est donnée par la relation suivante : $10 \log(1 - \alpha)$.

Ainsi, le coefficient d'absorption α est fonction de la nature de la surface considérée ; à titre d'exemple, un sol enherbé possèdera une capacité d'absorption beaucoup plus importante qu'un sol rigide type route.

L'équation du niveau de puissance, pour une source ponctuelle devient alors :

$$L_w + 10 \cdot \log(1 - \alpha) = L_p + 10 \log(r^2) + 8 \Leftrightarrow L_w = L_p + 10 \log(r^2) + 8 - 10 \log(1 - \alpha) \quad (31)$$

Ainsi pour un surface de coefficient $\alpha = 0.5$, l'atténuation sera égale à 3 dB(A) et donc l'équation de puissance acoustique définit par $L_w = L_p + 10 \log(r^2) + 11$. De la même manière, pour une source linéique, la relation devient $L_w = L_p + 10 \log r + 11$.

III.3.1.4- Existence d'obstacle

Lorsqu'une onde sonore rencontre un obstacle rigide, type mur antibruit (considéré de longueur infinie), son énergie va subir différents phénomènes (Fig.56). En effet, une partie va se réfléchir sur l'obstacle (totalement ou partiellement suivant les caractéristiques d'absorption de la structure), une autre va traverser l'obstacle pour se transformer en vibrations mécaniques qui peuvent éventuellement rayonner de nouvelles ondes acoustiques. Enfin, le reste va contourner l'obstacle non sans perturbation du champ acoustique et il en résulte généralement une réduction de la pression acoustique derrière l'obstacle (CETUR, 1980).

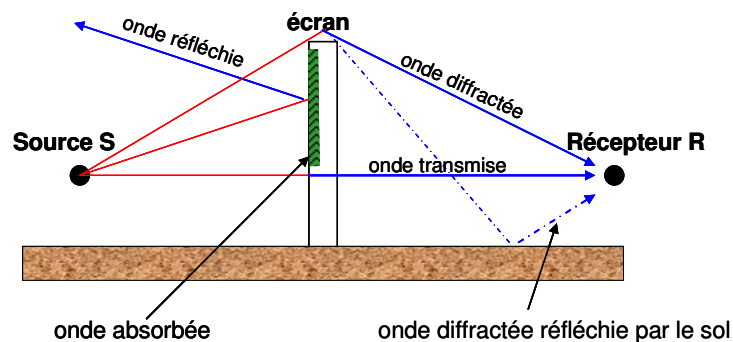


Fig. 56 : L'effet d'écran (d'après CETUR, 1980)

Il existe trois méthodes principales pour évaluer l'efficacité d'un écran (CETUR, 1980):

- Effectuer des calculs suivant différentes théories (Pierce, 1981),
- Réaliser des mesures sur des maquettes à échelle réduite ($1/n$) à condition de multiplier les fréquences par n ,
- Utiliser des abaques ou des tables de résultats, le plus fréquemment utilisés (CETUR, 1980) étant l'abaque de Maekawa (Fig.57) qui ne fait dépendre l'efficacité de l'écran que du nombre de Fresnel, $N = 2\delta/\lambda$ avec δ , la différence de marche (Fig.58) et λ , la longueur d'onde du son incident (Maekawa, 1968).

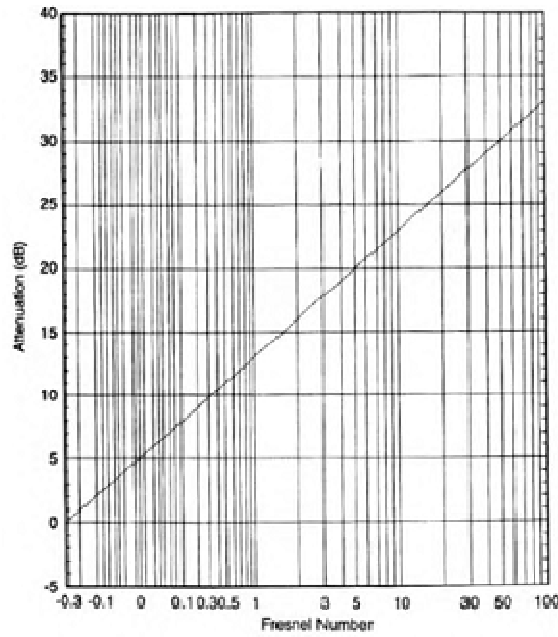


Fig. 57 : Calcul de l'atténuation due à un écran par l'abaque de Maekawa

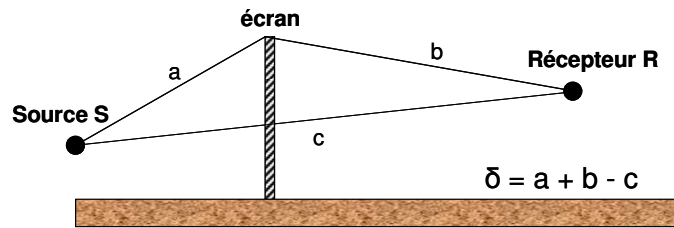


Fig. 58 : Définition de la différence de marche (δ)

D'une façon plus empirique, la valeur de l'atténuation (Att) due à la présence d'un écran peut alors être déterminée grâce à la formule suivante :

$$Att = 10 \cdot \log(3 + 20N) \quad (32)$$

Dans le cas d'obstacle épais (épaisseur > 1 m), le calcul de la différence de marche est modifié et devient : $\delta = a + b + d - c$ (Fig. 59).

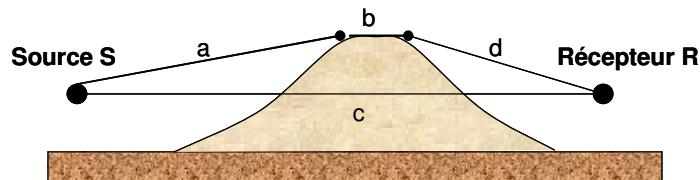


Fig. 59 : Différence de marche pour un écran épais (> 1 m)

Lorsque l'obstacle se trouve être un écran végétal, la détermination de l'atténuation due à ce dernier est très délicate et très controversée. En effet, cette atténuation est fonction de nombreux paramètres tels que la nature et la répartition de la végétation (Fig. 60).

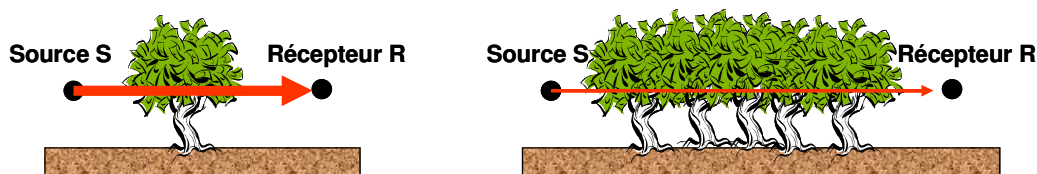


Fig. 60 : Effet de la végétation

La diminution générée par une seule rangée d'arbres n'est pas significative (Zouboff et Terme, 1999). Cependant, l'impact psychologique apparaît très souvent important au vu de la population avoisinante et la mise en place d'une telle structure est généralement ressentie comme positive de part le fait qu'elle cache la source sonore. Dans le cas d'une végétation dense, certains auteurs (Embleton, 1963) autorisent une atténuation de 10 dB(A) pour 100 m de végétation.

III.3.2- Le modèle CADUR

Les sources d'émissions sonores au sein d'une exploitation sont nombreuses et présentes à tous les stades de l'élaboration des matériaux. L'utilisation d'explosif (dans le cas de carrière de roches massives), les engins statiques tels que les cribles et les concasseurs, les chocs des matériaux entre eux ou bien encore la présence d'engins de chantiers nécessaires au transport et au chargement des matériaux vont être générateurs d'émissions sonores. Le travail s'est focalisé sur une seule de ces sources potentielles, en l'occurrence les engins de chantiers.

La directive 2000/14/CE (Directive, 2000), modifiée par la directive 2005/88/CE (Directive, 2005), relative aux émissions sonores des matériels destinés à être utilisés à l'extérieur des bâtiments fixe, pour chacun des types de matériels considérés, des exigences concernant les niveaux admissibles d'émissions sonores (Tableau 38), les codes d'essais acoustiques, l'étiquetage et les procédures d'évaluation de la conformité.

Tableau 38 : Niveau de puissance acoustique admissible fixée par la directive 2005/88/CE

«Type de matériel	Puissance nette installée P , en kW Puissance électrique P_{el} en kW ⁽¹⁾ Masse m de l'appareil, en kg Largeur découpe L , en cm	Niveaux admissibles de puissance acoustique en dB/1 pW	
		Phase I à compter du 3 janvier 2002	Phase II à compter du 3 janvier 2006
Engins de compactage (rouleaux compacteurs vibrants et plaques et pilonneuses vibrantes)	$P \leq 8$	108	105 ⁽²⁾
	$8 < P \leq 70$	109	106 ⁽²⁾
	$P > 70$	$89 + 11 \lg P$	$86 + 11 \lg P$ ⁽²⁾
Boutteurs, chargeuses, chargeuses-pelleteuses sur chenilles	$P \leq 55$	106	103 ⁽²⁾
	$P > 55$	$87 + 11 \lg P$	$84 + 11 \lg P$ ⁽²⁾
Boutteurs, chargeuses, chargeuses-pelleteuses sur roues, tombereaux, niveleuses, compacteurs de remblais et de déchets de type chargeuse, chariots élévateurs en porte-à-faux à moteur à combustion interne, grues mobiles, engins de compactage (rouleaux compacteurs non vibrants), finisseurs, groupes de puissance hydraulique	$P \leq 55$	104	101 ⁽²⁾ ⁽³⁾
	$P > 55$	$85 + 11 \lg P$	$82 + 11 \lg P$ ⁽²⁾ ⁽³⁾
Pelles, monte-matériaux, treuils de chantier, motobineuses	$P \leq 15$	96	93
	$P > 15$	$83 + 11 \lg P$	$80 + 11 \lg P$
Brise-béton et marteaux-piqueurs à main	$m \leq 15$	107	105
	$15 < m < 30$	$94 + 11 \lg m$	$92 + 11 \lg m$ ⁽²⁾
	$m \geq 30$	$96 + 11 \lg m$	$94 + 11 \lg m$
Grues à tour		$98 + \lg P$	$96 + \lg P$
Groupes électrogènes de soudage et de puissance	$P_{el} \leq 2$	$97 + \lg P_{el}$	$95 + \lg P_{el}$
	$2 < P_{el} \leq 10$	$98 + \lg P_{el}$	$96 + \lg P_{el}$
	$10 > P_{el}$	$97 + \lg P_{el}$	$95 + \lg P_{el}$
Motocompresseurs	$P \leq 15$	99	97
	$P > 15$	$97 + 2 \lg P$	$95 + 2 \lg P$
Tondeuses à gazon, coupe-gazon/coupe-bordures	$L \leq 50$	96	94 ⁽²⁾
	$50 < L \leq 70$	100	98
	$70 < L \leq 120$	100	98 ⁽²⁾
	$L > 120$	105	103 ⁽²⁾

Certains engins potentiellement présents sur une exploitation tels que les appareils de forage ne sont pas recensés dans le tableau 38. Cependant, les directives européennes précitées énumèrent, dans son article 13, une liste de matériels (dont les engins de forage) pour lesquels le niveau de puissance acoustique garanti est soumis uniquement au marquage du niveau sonore ; ce qui de fait, facilite l'obtention des données.

Par ailleurs, une étude, menée par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Blois en 1997, a déterminé le niveau de puissance acoustique (L_w) sur 90 engins (7 boutteurs, 3 chargeuses sur chenilles, 3 chargeuses sur pneus, 7 chargeuses-pelleteuses, 1 compacteur, 56 pelles sur chenilles, 7 pelles sur pneus, 1 tractopelle et 5 foreuses). Le tableau 39 montre des valeurs d'écarts moyens ainsi que des valeurs d'incertitudes relativement faibles.

De plus, considérant l'année de réalisation de cette étude ainsi que l'âge des engins considérés (entre 1982 et 1997), les niveaux de puissance estimés à partir de la directive 2005/88/CE peuvent être considérés comme représentatifs des niveaux réels.

*Tableau 39 : Différence de Lw entre les valeurs mesurées et les valeurs fixées
par la directive 2005/88/CE (phase II)*

Type	Nb échantillon	écart en %		
		Moyenne	écart type	incertitude (écart max/ $\sqrt{3}$)
Boueur	7	3	3,20	5
Chargeuse sur chenilles	3	3	2,80	3
Chargeuse sur pneus	3	-4	4,13	-2
Chargeuse-pelleteuse	7	-5	2,10	-4
Compacteur	1	-7	/	/
Pelle sur chenilles	56	2	2,71	5
Pelle sur pneus	7	4	5,86	7
Tractopelle	1	-1	/	/
Foreuse	5	7	2,43	5
Total	90	2	4,12	-6

Remarque : puisqu'aucune valeur réglementaire ne peut être fixée pour les engins de forage, une formule type a été appliquée en l'occurrence, $83 + 11 \cdot \log_{10} P$.

III.3.2.1- la méthode proposée par le LRPC de Blois

La méthodologie proposée dans l'outil CADUR est fondée sur la méthode de calculs prévisionnels du bruit imputable à la réalisation de chantiers, mise au point par le LRPC de Blois (Mériel et Bonhomme, 2001). Cette démarche propose de déterminer le niveau sonore global au point de réception à partir des niveaux de chacun des engins présents, eux-mêmes estimés à partir de leur niveau de puissance acoustique (obtenu à partir d'une base de données) auquel sont apportées différentes corrections (Tableau 40).

Tableau 40 : Facteurs de correction utilisés dans la méthode du LRPC de Blois

Correction de distance Cd		Correction d'écran Ce	Correction de temps de fonctionnement Ctf	Correction due à la présence d'un réflecteur Cr
sol réfléchissant : 20 log d +8	sol absorbant : 20 log d +11	variable (cf ci- dessous)	10 log (Ft/100)	3

avec : d, distance entre la source et le récepteur (en mètres) ; Ft, pourcentage de la durée de fonctionnement réel de l'engin sur la période de référence considérée (jour : 7 h – 20 h et nuit 20h – 7h).

Le facteur correctif Cr de +3 dB(A) est appliqué lorsqu'une structure réfléchissante est présente à moins de 3 mètres du point récepteur. Concernant la correction d'écran (Ce), un facteur est appliqué en cas de présence d'un écran (merlon, écran végétal, ...) entre la source et le récepteur. Ce facteur correctif, tenant compte non seulement de la hauteur de cet obstacle mais également des distances « sources/écran » et « écran/récepteur », est obtenu à partir de différents abaques.

La méthode du LRPC détermine ensuite le niveau LAeq de chaque engin au point récepteur en appliquant une formule mathématique ; cette dernière est fonction de la mobilité ou non de la source considérée (Tableau 41). En effet, la méthode distingue quatre types de sources en fonction de la dimension de sa zone de travail, l.

Tableau 41 : Formules de détermination du LAeq selon le type de source.

Type de source	Source fixe	Source mobile opérant sur une aire de travail restreinte	Source mobile opérant sur une aire de travail de grande dimension	Source faiblement mobile
		$d \geq 1,5 l$ (avec $l < 30$ m)	source effectuant des "allers-retours"	vitesse de la source $< 10 \text{ km.h}^{-1}$ et $l > 30$ m
LAeq		$LWA - Cd + Ctf - Ce + Cr$	$LWA - 33 + 10 \log Q - 10 \log V - 10 \log d + Ctf - Ce + Cr$	$LWA - Cd + Ctf - Ce + Cr + 10 \log (Fc/100)$

avec : Q, le nombre de passage horaire de la source devant le point récepteur ; V, la vitesse moyenne de la source (km.h^{-1}) ; Fc, facteur d'équivalence dépendant du rapport l_p/d où l_p est la distance parcourue.

II.3.2.2- la méthode proposée dans l'outil CADUR

La méthode appliquée dans l'outil CADUR utilise certaines hypothèses de calculs prises afin de simplifier le modèle et surtout de limiter le nombre de paramètres nécessaires à l'évaluation :

- les conditions météorologiques ne sont pas prises en considération dans le modèle et ce pour les raisons suivantes :

Les engins de chantiers émettent surtout dans le domaine des basses fréquences ; l'atténuation due aux conditions atmosphériques sont, de ce fait, relativement faibles voire négligeables,

La température et l'humidité étant des paramètres fortement variables, par soucis de simplifications (dans la construction du modèle et dans son utilisation), leurs influences respectives ne sont pas prises en compte,

S'il est aisé de constater l'influence du vent sur la propagation des ondes sonores, il est infiniment plus difficile de modéliser son effet (CETUR, 1980).

- **tous les engins sont considérés comme des sources fixes ou travaillant sur une aire de petite dimension.** Ceci permet, en effet, d'éliminer deux paramètres que sont la vitesse (V) et le nombre d'« allers-retours » (Q). De plus, au regard des valeurs du LAeq estimées (Tableau 42) selon les deux méthodes (écarts \leq à 2 dB(A)), cette hypothèse semble être cohérente.

Tableau 42 : Comparaison des LAeq selon les méthodes du LRPC et de CADUR

LWA (dB(A))	distance (m)	Ft (%)	Q	V (km.h^{-1})	LAeq CADUR (dB(A))	LAeq LRPC Blois (dB(A))
95	70	60	30	5	48	49
111	70	70	32	5	65	66
100	100	60	35	10	50	50
105	300	60	20	25	45	44
110	1000	60	23	45	40	42

- **le sol est considéré comme réfléchissant.** Par conséquent, la correction de distance (Cd) appliquée est définie par $20 \log d + 8$ alors que pour un sol parfaitement absorbant, elle serait de $20 \log d + 11$.

- **aucune correction de réflexion n'est prise en compte.**

- **les valeurs d'atténuation lors de la présence de merlons** ont été obtenues suivant l'approche de Maekawa en assimilant ce type de protection sonore à des écrans minces. En bruit routier et en première approximation, il est classiquement pris la valeur d'atténuation à la fréquence de 500 Hz (Bérengrier, communication orale). Il en est de même dans l'outil CADUR. Ainsi :

$$Att = 10 \cdot \log(3 + 20 \cdot N) = 10 \cdot \log\left(3 + 20 \cdot \frac{2\delta \cdot f}{c}\right) = 10 \cdot \log\left(3 + \frac{20000\delta}{345}\right) \quad (33)$$

Différentes configurations de distances (source/écran, écran/récepteur) et de hauteurs ont été réalisées afin de déterminer des valeurs de différence de marche et donc d'atténuation. Parmi toutes celles obtenues ont été retenues dans l'outil CADUR, les valeurs les plus faibles. L'atténuation engendrée par les merlons ne prend en considération que la hauteur de ces derniers ce qui une fois de plus simplifie le nombre de paramètres que doit renseigner l'utilisateur. Ainsi, les valeurs d'atténuation pour des merlons de 2, 3 et 4 mètres sont respectivement de 5, 7 et 9 dB(A).

- **les valeurs d'atténuation lors de la présence d'écrans végétaux** sont proportionnelles à l'épaisseur de l'écran, à raison de 1 dB(A) par 10 m de végétation. Toutefois, une valeur maximale de 3 dB(A) a été retenue.

Le schéma général du principe de détermination du niveau de bruit généré par l'utilisation des engins de chantiers est représenté dans la figure 61.

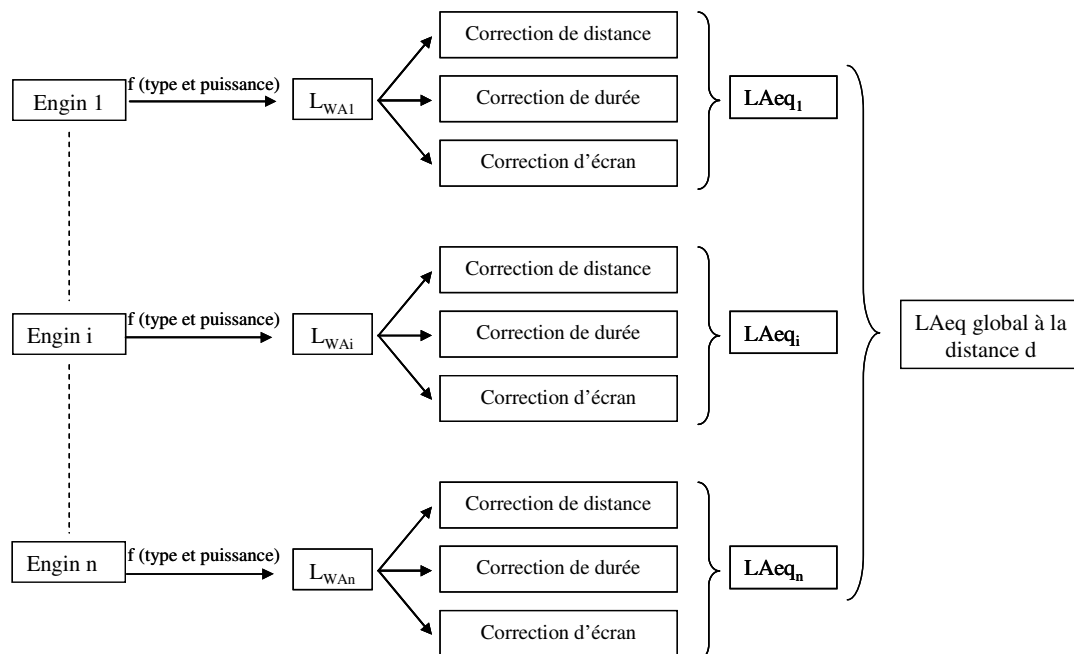


Fig. 61 : Principe du calcul de détermination du niveau sonore

Ainsi pour chaque engin présent sur le site d'exploitation, les calculs suivants peuvent être réalisés :

- détermination du niveau de puissance acoustique de l'engin :

$$LWA_i = x + y \cdot \log P_i \quad (34)$$

avec : x et y , constantes fonction du type d'engin et P_i , puissance de l'engin (kW) (cf Tableau 38)

- application des différents correctifs :

$$LAeq_i = LWA_i - Cd - Ce + Ctf \Leftrightarrow LWA_i - 20 \cdot \log d - 8 - Att + 10 \cdot \log\left(\frac{Ft_i}{100}\right) \quad (35)$$

avec : Cd , correction vis-à-vis de la distance $d = -20 \log d - 8$; Ce , correction due à la présence d'une protection sonore = Att ; et Ctf , correction vis-à-vis de la durée de fonctionnement = $10 \log (Ft_i/100)$

- détermination du niveau global à la distance d :

$$LAeq = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n \left[10^{\frac{LAeq_i}{10}} \right] \quad (36)$$

De la même manière, nous pouvons déterminer la distance à partir de laquelle un niveau sonore de référence est atteint. Pour ce faire, la méthode suivante a été appliquée :

$$(35) \text{ dans } (36) : LAeq = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n \left[10^{\frac{LWA_i - 20 \cdot \log d - 8 - Att + 10 \cdot \log\left(\frac{Ft_i}{100}\right)}{10}} \right] \quad (37)$$

$$\text{En posant } \begin{cases} Ai = \frac{LWA_i - 8 - Att + 10 \cdot \log\left(\frac{Ft_i}{100}\right)}{10} \\ D = -2 \cdot \log d \end{cases}$$

$$LAeq = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n [10^{Ai+D}] = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n [10^{Ai} \cdot 10^D] \quad (38)$$

D étant une constante, $10^D = \text{constante}$ donc,

$$10^{\frac{LAeq}{10}} = 10^D \left(\sum_{i=1}^n [10^{Ai}] \right) \Leftrightarrow 10^{-D} = 10^{-D} = 10^{\frac{-LAeq}{10}} \cdot \left(\sum_{i=1}^n [10^{Ai}] \right) \quad (39)$$

En remplaçant le système posé, on obtient :

$$10^{2 \cdot \log d} = 10^{\log d^2} = d^2 = 10^{\frac{-LAeq}{10} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \left[10^{\frac{LWA_i - 8 - Att + 10 \log \left(\frac{F_{fi}}{100} \right)}{10} \right]} \right)} \quad (40)$$

Ainsi la distance (en mètres) à partir de laquelle le niveau LAeq (dB(A)) est atteint peut être déterminée par la formule suivante :

$$d = \sqrt{10^{\frac{-LAeq}{10} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \left[10^{\frac{LWA_i - 8 - Att + 10 \log \left(\frac{F_{fi}}{100} \right)}{10} \right]} \right)}} \quad (41)$$

IV- L'outil CADUR

L'outil CADUR (Fig.62) a été programmé dans le langage Visual Basic (Visual Basic 2005 Express) dans un souci, à la fois, de compatibilité et de sécurité. En effet, comme tous les compilateurs (C, C++, SDK, ...), ce langage de programmation permet de créer des fichiers exécutables, limitant ainsi les problèmes de compatibilités de version (existantes avec les macros Excel) mais aussi ne permettant pas un accès simple pour l'utilisateur, une fois compilé, au code source ; évitant de ce fait, de potentielles modifications de ce dernier.

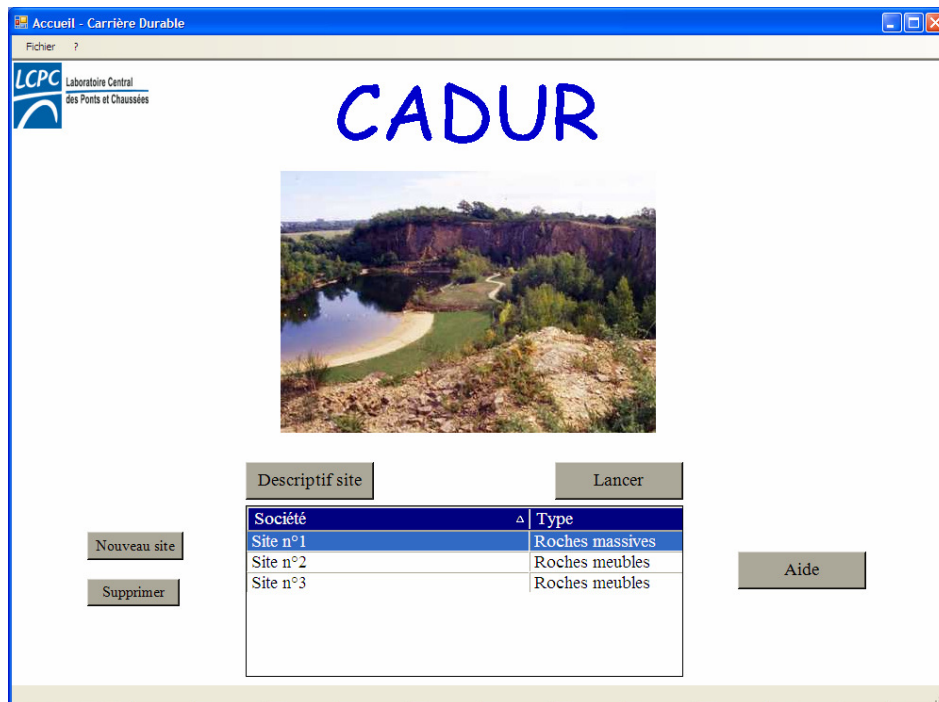


Fig. 62 : Page d'accueil de l'outil CADUR

IV.1- Principes fonctionnels de l'outil

L'utilisateur est invité à rentrer un certains nombres de paramètres ou informations relatifs à l'exploitation et à sa configuration (Fig.63).

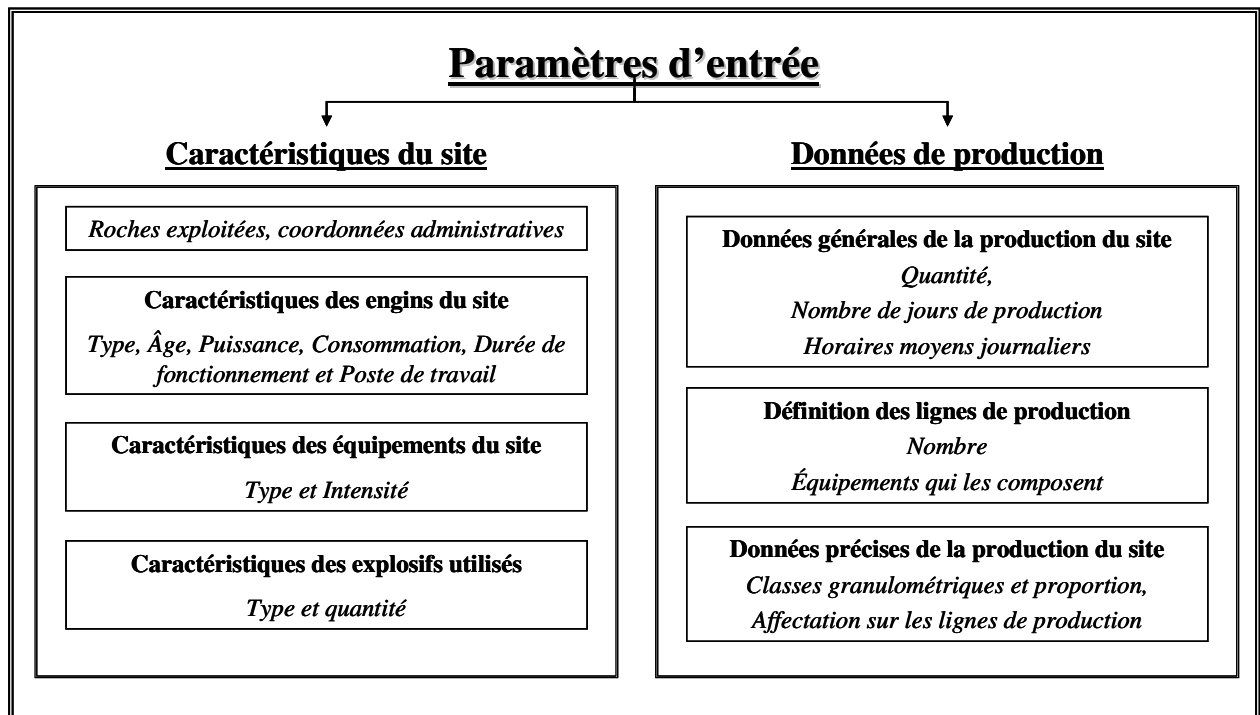


Fig. 63 : Paramètres d'entrée de l'outil CADUR

L'ensemble des données, une fois renseigné, est alors stocké et enregistré dans une base de données (type Access). L'existence de cette base de données permet une gestion d'un parc d'exploitation et/ou la possibilité de constituer différentes configurations pour un même site permettant ainsi d'apprécier l'impact de la configuration par variation des indicateurs. La structure de la base de données créée dans CADUR relie, entre elles, toutes les informations via le nom du site. La structure générale de CADUR est présentée en figure 64.

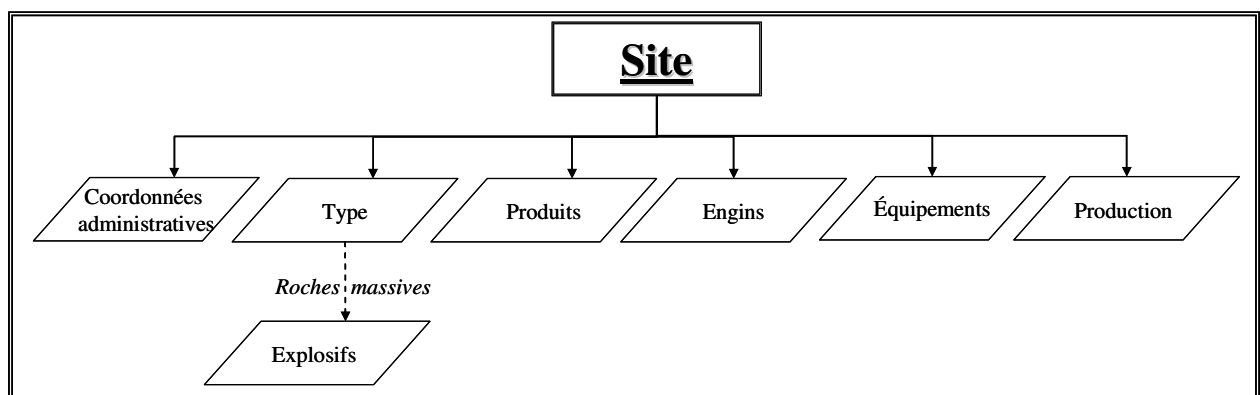


Fig. 64 : Structure de la base de données « sites » de CADUR

IV.2- Fonctionnalités de l'outil d'évaluation CADUR

Après avoir renseigné l'ensemble des paramètres nécessaires aux calculs, l'utilisateur choisit alors parmi les 3 modèles développés : Énergie, Rejets atmosphériques ou Bruit. Selon le modèle ainsi sélectionné, plusieurs options de calculs sont disponibles (Fig.65).

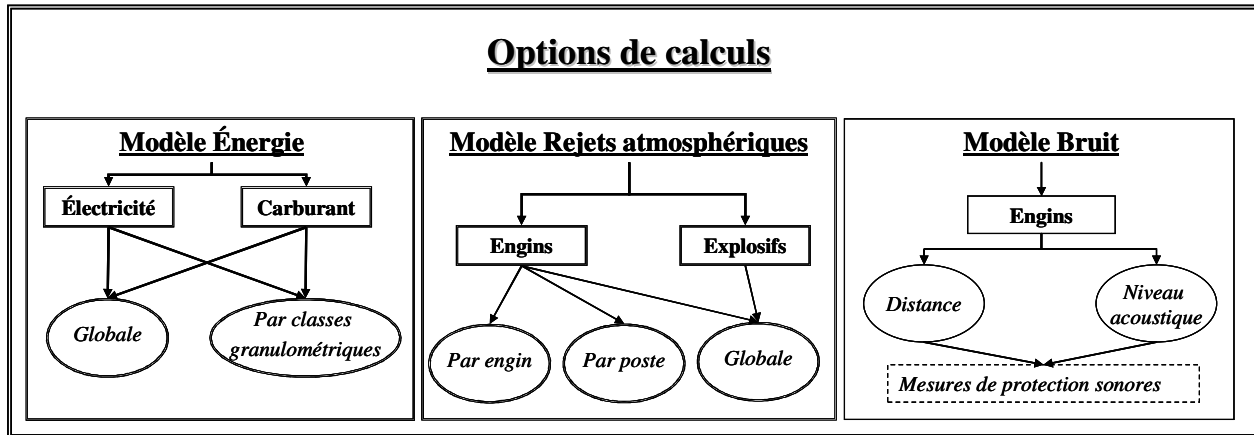


Fig. 65 : Options de calculs par modèles développés.

IV.2.1- Le modèle Énergie,

Le modèle énergie, est conçu, dans l'outil CADUR, de façon à déterminer pour chacun des produits élaborés, la consommation spécifique en électricité et en combustible fossile (fioul). Il fixe également les consommations globales annuelles des deux sources énergétiques pour l'ensemble de l'exploitation de carrière considérée. L'affichage des résultats obtenus par le modèle est à la fois numérique et graphique (Fig.66).

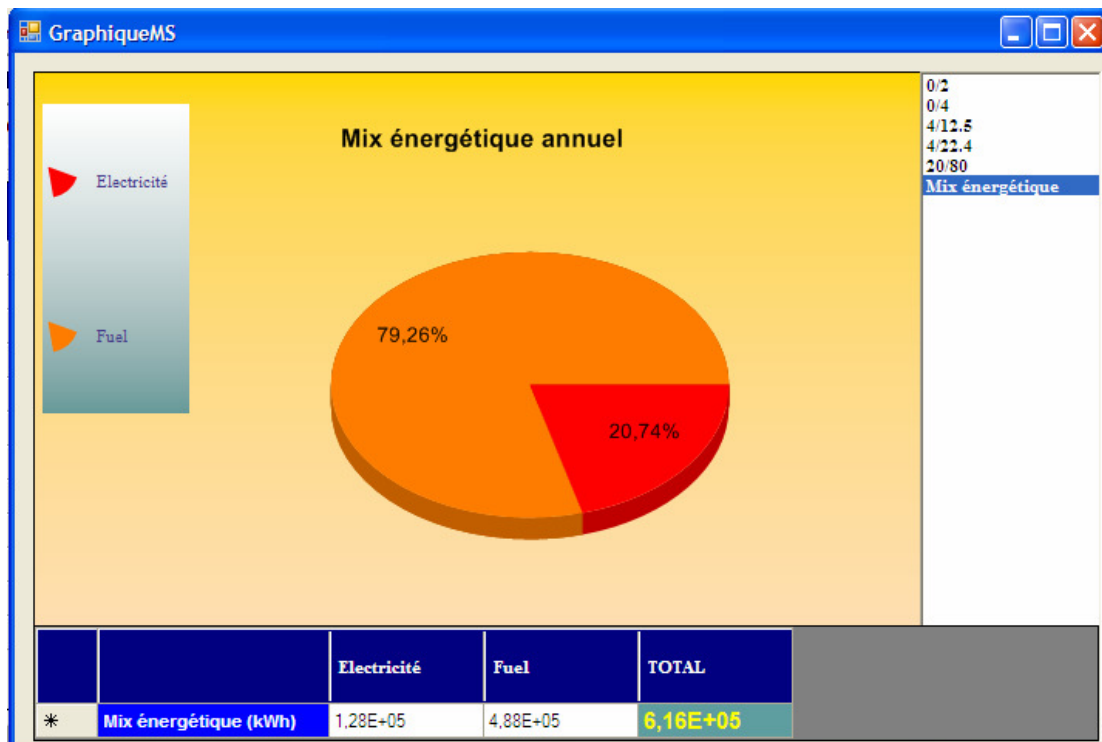


Fig. 66 : Affichage des consommations énergétiques

IV.2.2- Le modèle Rejets atmosphériques,

L'outil CADUR détermine les rejets atmosphériques de 17 gaz différents pour les émissions générées par les engins de carrière et de 9 substances chimiques pour ce qui concerne les émissions imputables aux tirs d'abattage. L'utilisateur est invité à choisir le mode de calcul qu'il souhaite réaliser : par engins, par poste ou des explosifs. L'ensemble de ces émissions est décrit dans le chapitre 1. Ces rejets, estimés en grammes, sont ramenés à la tonne de granulats produits. Le total par substance est également déterminé (Fig.67).

Engins	Référence	NOx (g.t ⁻¹)	COVNM (g.t ⁻¹)	CO (g.t ⁻¹)	PM _{2,5} (g.t ⁻¹)	PM ₁₀ (g.t ⁻¹)	SO ₂ (g.t ⁻¹)	N ₂ O (g.t ⁻¹)	CH ₄ (g.t ⁻¹)	CO ₂ (g.t ⁻¹)
Autres	1100	1,32	2,20E-01	7,70E-01	4,27E-02	1,32E-03	2,06E-01	7,70E-02	1,10E-02	149,03
Chargeur sur pneu	950 F	11,67	9,45E-01	3,76	5,44E-01	1,68E-02	6,67E-01	3,63E-01	5,19E-02	289,88
Pelle	330	12,05	1,7	6,55	6,86E-01	2,12E-02	6,37E-01	4,58E-01	6,55E-02	349,98
Tombereau	perlini	15,59	1,26	5,02	7,27E-01	2,25E-02	2,08E-01	4,86E-01	6,94E-02	120,31
Tombereau	R350 trx	11,07	1,84	6,46	3,58E-01	1,11E-02	3,13E-01	6,46E-01	9,22E-02	245,34
Total		51,7	5,97	22,56	2,36	7,29E-02	2,03	2,03	2,90E-01	1,15E+03

Engins	Référence	NH ₃ (g.t ⁻¹)	POP (g.t ⁻¹)	Cadmium (g.t ⁻¹)	Cuivre (g.t ⁻¹)	Chrome (g.t ⁻¹)	Nickel (g.t ⁻¹)	Sélénium (g.t ⁻¹)	Zinc (g.t ⁻¹)
Autres	1100	4,40E-04	1,55E-04	4,68E-07	7,95E-05	2,34E-06	3,27E-06	4,68E-07	4,68E-05
Chargeur sur pneu	950 F	2,08E-03	3,06E-04	9,22E-07	1,57E-04	4,61E-06	6,46E-06	9,22E-07	9,22E-05
Pelle	330	2,62E-03	3,72E-04	1,12E-06	1,90E-04	5,60E-06	7,84E-06	1,12E-06	1,12E-04
Tombereau	perlini	2,77E-03	1,31E-04	3,95E-07	6,72E-05	1,98E-06	2,77E-06	3,95E-07	3,95E-05
Tombereau	R350 trx	3,69E-03	2,62E-04	7,91E-07	1,34E-04	3,95E-06	5,53E-06	7,91E-07	7,91E-05
Total		1,16E-02	1,23E-03	3,70E-06	6,28E-04	1,85E-05	2,59E-05	3,70E-06	3,70E-04

Fig. 67 : Tableau de résultats des rejets atmosphériques

L'outil CADUR permet également une visualisation des rejets atmosphériques au travers des graphiques de répartition (Fig.68). Cette fonctionnalité permet un repérage facile des engins ou postes majoritairement responsables des pollutions atmosphériques.

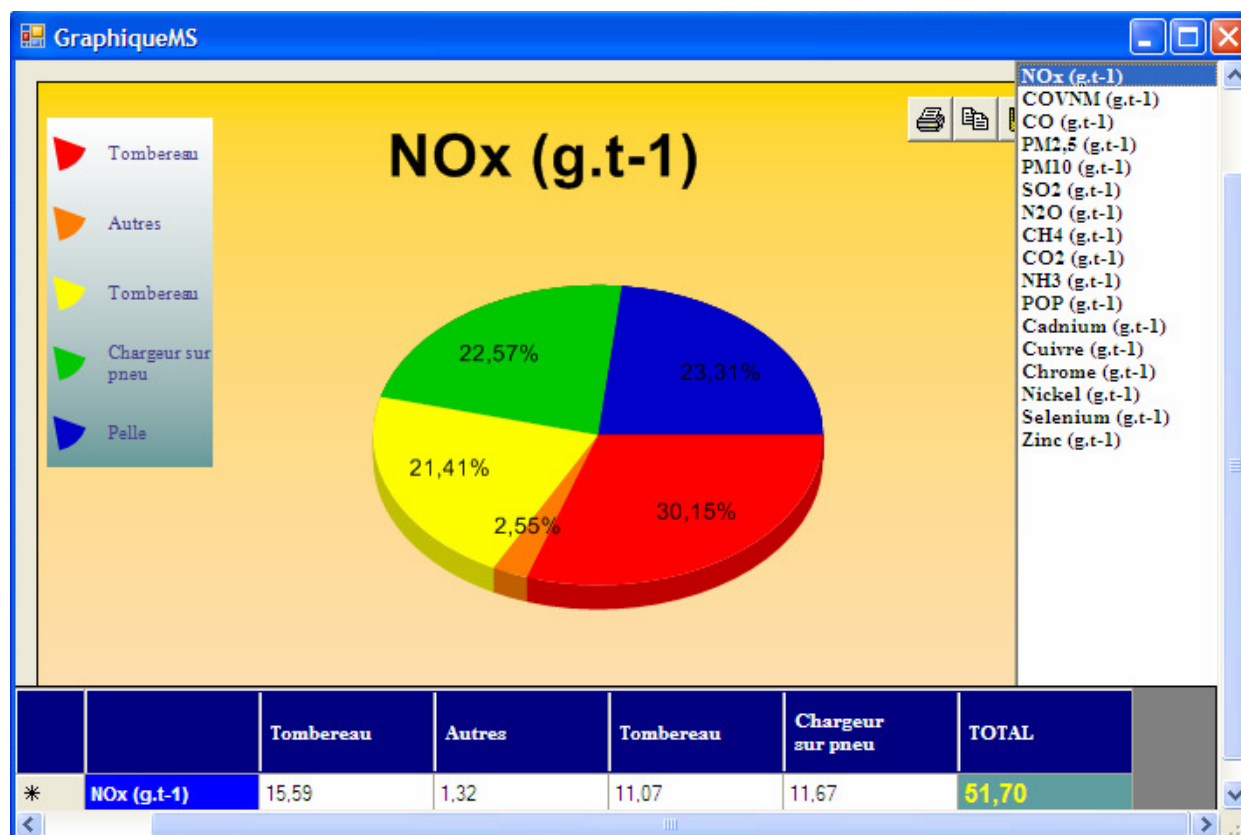


Fig. 68 : Graphiques de répartition des rejets atmosphériques

IV.2.3- Le modèle Bruit,

De la même manière que pour les calculs de consommations énergétiques ou de rejets atmosphériques, l'indicateur bruit propose deux modes de calculs. En effet, il permet de déterminer une distance, en mètres, à partir de laquelle un niveau de bruit est atteint ou de fixer le niveau de bruit, en dB(A), atteint à une distance donnée. Une fois le mode sélectionné, l'utilisateur est invité à renseigner si des mesures de protection sonores sont prises sur l'exploitation. Le cas échéant, il doit les sélectionner parmi celles proposées, à savoir merlons de 2, 3 ou 4 mètres et écrans végétal d'une épaisseur comprise entre 10 et 20 m, entre 20 et 30 m ou supérieure à 30m. Cette fonctionnalité permet d'apprécier l'influence de la mise en place d'un dispositif de réduction des nuisances sonores (Fig.69) et/ou de réfléchir quant au choix d'une telle structure selon le contexte du site. En effet, la sélection s'effectue en corrélation avec les populations avoisinantes.

Niveau sonore = 50 dB(A)	
Mesure de protection	Distance (m)
aucune	307
écran végétal de 10 à 20 mètres d'épaisseur	274
écran végétal de 20 à 30 mètres d'épaisseur	244
écran végétal d'au moins 30 m d'épaisseur	217
merlon d'une hauteur de 2 m	173
merlon d'une hauteur de 3 m	137
merlon d'une hauteur de 4 m	109

Fig. 69 : Influence des mesures de protection sonore

V- Conclusion

L'outil présenté dans ce chapitre permet de réaliser une évaluation de sites de carrière très différents de par leur nature de roche (massives ou meubles), leurs capacités de production et équipements associés, tant au niveau des types d'équipements (concasseurs, cribles, bandes transporteuses) que des types d'engins (dumpers, pelles...). Les catégories d'équipements et d'engins sont paramétrables via leurs caractéristiques (puissances, années de fabrication), leur mode de fonctionnement sur l'installation aussi. Des données environnementales d'émissions relatives aux rejets gazeux des explosifs et aux rejets gazeux des moteurs d'engins sont incorporées dans les modèles. Concernant les premières, limitées en nombre de par leur rareté, elles devront faire l'objet d'une recherche et d'une étude beaucoup plus approfondie afin d'obtenir des données sur l'ensemble des explosifs disponibles sur le marché. Concernant les secondes, on rappelle qu'elles sont issues non pas de mesures sur des engins mais basées sur des données réglementaires fixées en matière d'émission de moteurs.

Les fonctionnalités retenues pour l'outil CADUR font qu'il permet à la fois le suivi annuel d'un site particulier, l'estimation de l'incidence d'une modification d'équipement ou d'engin sur le bilan environnemental des granulats produits, ainsi que d'établir un profil environnemental avant la mise en service d'une nouvelle exploitation. L'interface utilisateurs développée rend assez facile les applications de l'outil à un grand nombre de sites différents. Néanmoins avant d'exploiter plus avant les possibilités offertes, il convient d'effectuer une validation des calculs réalisés dans des configurations de production de granulats pour lesquelles des données sont disponibles.

CHAPITRE IV -
Modélisation environnementale des consommations, rejets
atmosphériques et émissions sonores de la production de
granulats en carrière

Introduction

Ce chapitre présente, en s'appuyant sur les différents sites de carrières étudiés dans ce travail, l'aptitude à simuler les consommations d'énergie, les rejets à l'atmosphère et les émissions sonores produites à différents postes d'une exploitation de carrière. Les trois sites étudiés aux chapitres précédents sont utilisés pour réaliser des calculs avec l'outil développé et les trois modèles qu'il comprend (Energie, Rejets atmosphériques et Bruits).

Les principes de modélisation des sites sont d'abord précisés, notamment l'étape de configuration des lignes de production, qu'il est nécessaire de réaliser avant de pouvoir exploiter les résultats du modèle, est explicitée.

Les simulations avec le modèle Energie, Rejets atmosphérique et Bruits sont ensuite proposées. On précise que la validation des modèles implémentés dans l'outil CADUR est réalisée uniquement en utilisant le jeu de données du site n°3 présenté au chapitre II en raison de la disponibilité des données. Il s'agit de confronter les estimations obtenues par le modèle Énergie et le modèle Bruit aux données réelles de site, en particulier aux résultats de mesure.

Au préalable il aura été nécessaire de caler les prédictions du mode d'élaboration des classes granulaires par la définition des lignes de production directes et avec recirculation au sein de l'installation. Il s'agit de l'étape de configuration. Or la détermination des coefficients d'affectation par ligne, réalisée par cette configuration, est une des étapes primordiales de l'évaluation environnementale qui fait l'objet d'une validation par comparaison avec les CESP fournies par l'exploitant. Ce point très particulier, lié à l'outil, est abordé au début de ce chapitre. Une fois la configuration effectuée, les résultats du modèle Energie peuvent être examinés. Dans un deuxième temps, des prédictions avec le modèle Rejets atmosphériques et le modèle Bruit sont également fournies afin d'apporter une analyse sur l'aptitude à prédire ces derniers.

Une fois les calculs réalisés dans ces conditions pour les trois sites, l'évaluation environnementale de la carrière de roches massives en tant que telle est récapitulée pour chacun des modèles ainsi que celle des deux carrières de roches meubles. Les valeurs obtenues par site étudié sont confrontées entre elles dans le cadre d'une discussion afin de donner un aperçu de la variabilité des différents indicateurs et paramètres environnementaux étudiés en relation à la fois avec la nature de la roche exploitée et avec la production de granulats.

I- Modélisation des sites avec l'outil CADUR

I.1 – Etapes de paramétrage du modèle pour un site

La première étape afin de valider l'outil CADUR passe par la vérification de son aptitude à simuler l'ensemble des procédés pouvant être mis en place pour produire les différentes classes granulométriques élaborées. Cela nécessite, pour chacun des sites sélectionnés, d'émettre différentes hypothèses de calculs :

Concernant les calculs des consommations de fioul, on émet l'hypothèse qu'elles sont indépendantes de la classe granulaire considérée compte tenu du niveau de détail obtenu dans les données collectées. De ce fait, pour chacune des classes granulaires, les valeurs de CESP en combustible fossile sont identiques. Concernant la flotte d'engins, seul le suivi des consommations est important ; il est à prendre en compte pour chacun des engins pour la modélisation.

Concernant les calculs des consommations d'électricité (décrits en figure 50, chapitre III), il convient de procéder à la définition du nombre de lignes de production potentielles puis à l'affectation, en pourcentage, des classes granulométriques produites sur l'ensemble des lignes de production ainsi définies. Il est en effet primordial dans un outil tel que celui développé de pouvoir transposer le choix du process. A titre d'exemple, il est indispensable de pouvoir configurer les différentes circulations des matériaux (et de pouvoir les moduler entre elles) en intégrant les phénomènes de recirculation au sein de l'installation de traitement. Ce point est d'autant plus crucial que le bilan massique par ligne de production doit être le plus proche possible de celui du site si on en dispose (cas du site n°1) ou déterminé par calculs successifs si on n'en dispose pas (cas des sites n°2 et 3). Lorsqu'aucune mesure n'est possible, l'affectation des matériaux produits par ligne est effectuée dans le modèle par déductions successives soit en éliminant les trajets improbables, soit en retenant les trajets évidents soit enfin en testant différents ratios massiques de granulats compris entre 0% et 100% pour les lignes de productions possibles. Ce travail étant fastidieux il est précisé en annexe 4 alors que pour chaque site les spécificités à résoudre en matière de trajets de matériaux via différentes lignes de production sont précisées ci-après. Ainsi, le choix des coefficients est fait arbitrairement en s'appuyant sur les éléments suivants : 1) la configuration n°1 considère que 100 % de la masse est produite directement sans aucune recirculation de matériaux au sein de l'usine d'élaboration. Il s'agit d'un cas extrême qui ne semble guère réaliste, 2) la configuration n°5 définit les différentes lignes potentielles comme équivalente entre elles. Il s'agit d'un autre cas extrême, guère plus réaliste, 3)) ensuite, les trois configurations intermédiaires ont été définies entre ces deux cas extrêmes en changeant la répartition de manière empirique, entre les lignes potentielles dont on diminue progressivement la masse qui leur est affectée et les autres lignes qu'on envisage de ne pas du tout utiliser ou avec le même coefficient d'affectation.

I.2 – Modélisation de la configuration de l'usine du site n°1

I.2.1- Définition des lignes de production pour le site n°1

Les lignes de productions potentielles sur le site n°1 ont pu être définies à partir du synoptique de l'installation (chapitre II). Ces lignes de production sont schématisées en annexe 3 ; au nombre de 11, elles peuvent être différenciées en lignes « directes » et lignes « indirectes ». Le tableau 43 récapitule, pour chaque classe granulométrique produite, le bilan massique, le nombre et l'affectation massique des matériaux aux lignes de production associées.

Tableau 43 : Lignes de production réelles par classes granulométriques sur le site n°1

Classes granulométriques	Production (%)	Nombre de ligne de production	N° de ligne
0/31,5 P	19,8	1	ligne 1
< 6,3	4,8	1	ligne 2
10/14	24,25	2	ligne 3 et 4
6,3/10	18,75	7	ligne 5 à 11
4/6,3	13,5	7	ligne 5 à 11
0/4	18,9	7	ligne 5 à 11

I.2.2- Description de la configuration de production pour le site n°1

La figure 70 détaille les classes granulaires produites par l'installation et rappelle le bilan massique mesuré par classe granulaire. On précise que les lignes 1, 2, 3 et 5 correspondent aux lignes de production directes, les lignes 4, 8, 10 et 11 aux lignes indirectes qui incluent la recirculation de la fraction > 14, les lignes 7 et 9 aux lignes indirectes comprenant la recirculation du 10/14 et la ligne 6 celle des autres fractions. Toutes les lignes de productions étant identifiées avec la masse de granulats produits associée, aucun test de configuration n'est nécessaire avec l'outil.

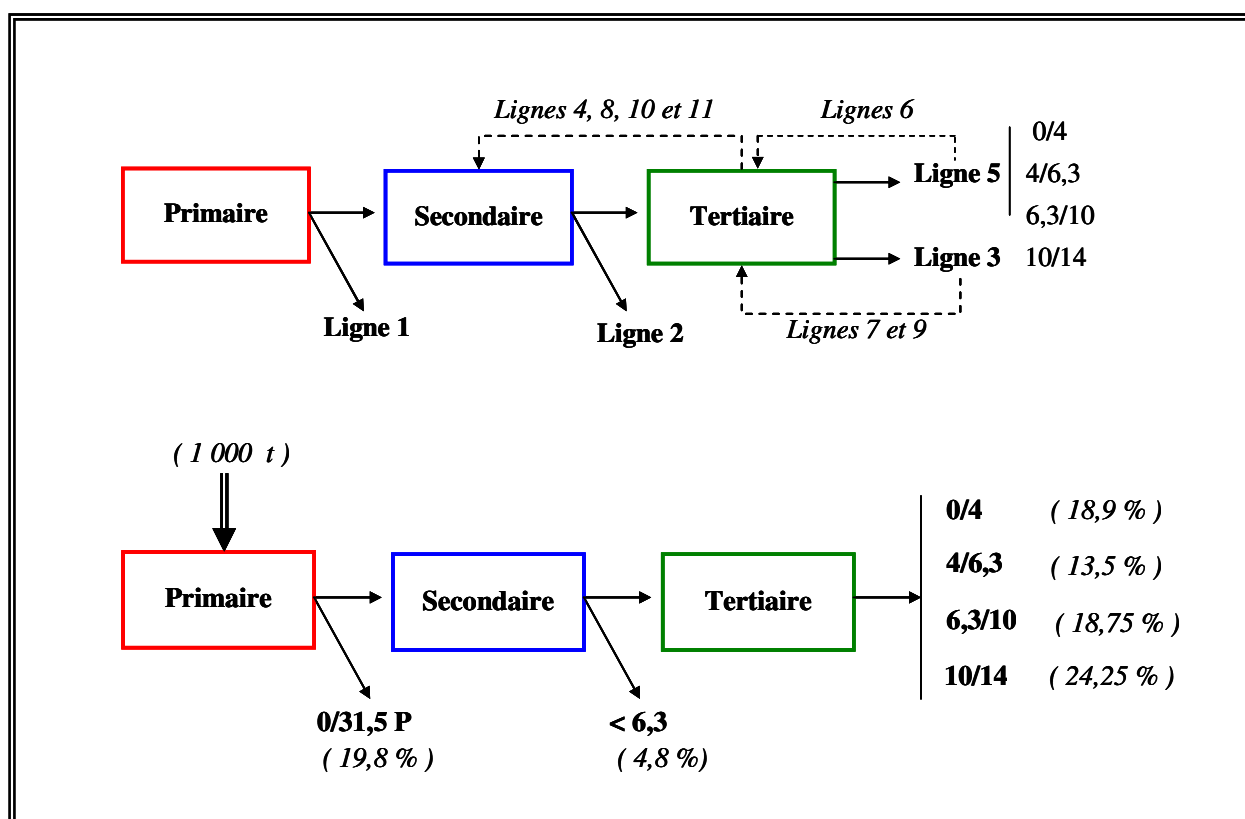


Fig. 70 : Lignes de production sur le site n°1 et bilans massiques associés (mesures de site)

I.3- Modélisation de la configuration de l'usine du site n°2

I.3.1- Définition des lignes de production pour le site n°2

De la même manière que pour le site n°1, l'ensemble des lignes de production a pu être défini à partir du synoptique de l'installation de traitement du site n°2 (chapitre II). Ces lignes de production (58 au total) sont schématisées en annexe 3 également. Contrairement au cas du site n°1, la distribution des masses produites par ligne potentielle n'a pas pu faire l'objet de mesure précise. Le pourcentage de chaque classe granulométrique produite (production) a été obtenu auprès de l'exploitant (Tableau 44). Le tableau 44 reprend également le nombre de lignes production pouvant être à l'origine de l'élaboration de ces différentes classes granulométriques pour lesquelles il s'agit d'estimer le coefficient d'affectation de la masse produite par ligne de production.

Tableau 44 : Lignes de production potentielles par classes granulométriques sur le site n°2
(f :fuseau ; sc : semi-concassé)

Classes granulométriques	Production (%)	Nombre de ligne de production	N° de ligne
0/2	5	2	ligne 1 et 2
0/4f	31	2	ligne 3 et 4
0/4sc	33	24	ligne 5 à 28
2/6	6	2	ligne 29 et 30
4/12,5	11	20	ligne 31 à 50
8/20	14	8	ligne 51 à 58

La contribution de chaque ligne de production à l'élaboration de chaque classe granulométrique n'étant pas connue, il a été nécessaire de tester différents scénarii de production afin de poursuivre l'étape de saisie des données du site. Ainsi, cinq configurations ont été successivement prises en considération concernant la répartition des différents granulats produits sur les lignes de production prédéfinies. Pour chaque classe granulométrique on procède en deux temps : on identifie les lignes inutiles et utiles puis on leur affecte un ratio de la production. Une première étape a consisté à considérer quelque soit la classe granulométrique produite, un stockage préalable à tout chargement des clients. En plus de mieux représenter la configuration réelle, le fait d'éliminer le chargement client direct élimine un certain nombre de lignes. Du fait de ce stockage préalable, les classes 0/2 et 0/4f sont intégralement élaborées à partir des lignes de production respective 2 et 4. Ensuite concernant la fraction 2/6, toute la masse produite passe par le stock, soit la ligne 29 (ce qui exclut la ligne 30). Si beaucoup de lignes peuvent être utilisées (exemple tableau 44, le 0/4 sc avec 24 lignes potentielles) un raisonnement par élimination des lignes inopérantes est conduit : choix du concasseur et du crible post-préstock, aucune double recirculation des matériaux...

I.3.2- Test des différentes configurations de production pour le site n°2

Pour chaque classe granulaire, les ratios de granulats en masse pour chacune des configurations envisagées sont détaillés dans l'annexe 4. Ainsi, pour chaque site, les simulations sont susceptibles d'être effectuées avec 5 configurations. De plus, un des paramètres essentiels à l'évaluation des consommations électriques est l'intensité réellement consommée par chacun des moteurs présents au sein de l'installation de traitement. Malheureusement, les valeurs d'intensité n'ont pu être ni mesurées ni obtenues auprès de l'exploitant pour le site n°2. Ainsi, les valeurs reportées dans l'outil CADUR (Annexe 5) ont été estimées en faisant correspondre les valeurs d'intensité nominale à celles observées sur les autres sites.

L'ensemble des configurations établies et présentées ci-dessus ont été testées. Le tableau 45 présente les différents résultats obtenus pour chacune des classes granulaires produites sur le site n°2. On constate :

- des valeurs de CESP fortement variables selon la classe granulométrique considérées. A titre d'exemple, les valeurs estimées entre le 2/6 et le 0/4 sc dans la configuration n°2 montrent un facteur 6 (1,7 contre 7,11),

- une certaine régularité des valeurs de CESP entre les différentes configurations. Ainsi, la fraction 0/2 montrent des valeurs comprises entre 5,41 et 6,49 ; La fraction 0/4f entre 3,85 et 4,15 ; La fraction 0/4sc entre 6,5 et 8,62 ; Le 2/6 entre 1,5 et 2,97 ; Le 4/12,5 entre 3,04 et 5,39 et le 8/20 entre 4,07 et 4,68,

- que quelque soit la configuration considérée, les fractions granulométriques sont identiques vis à vis de leur importance de leur coût énergétique. En effet, la fraction nécessitant le moins d'électricité est le 2/6 puis par ordre d'importance, le 4/12,5, le 0/4f, le 8/20, le 0/2 et le 0/4sc.

Tableau 45 : Consommations électriques, obtenues par CADUR, sur le site n°2 selon les différentes configurations

	Année 2005	configuration n°1	configuration n°2	configuration n°3	configuration n°4	configuration n°5
Estimations CADUR	0/2 (kWh.t ⁻¹)	6,49	5,41	5,58	5,61	5,59
	0/4 f (kWh.t ⁻¹)	3,85	4,15	3,98	4,01	3,99
	0/4 sc (kWh.t ⁻¹)	7,06	7,11	7,20	6,50	8,62
	2/6 (kWh.t ⁻¹)	2,97	1,70	1,67	1,50	1,59
	4/12,5 (kWh.t ⁻¹)	3,25	3,36	3,39	3,04	5,39
	8/20 (kWh.t ⁻¹)	4,42	4,48	4,56	4,07	4,68
	Consommation totales (kWh)	624 204	624 204	624 204	581 981	712 170
Fournies par l'exploitant	Consommation 2005 (kWh)	726 477				

Dans la suite du document, les valeurs présentées correspondent à celles déterminées avec la configuration n°3 qui semble être un bon compromis de distribution des lignes de production.

I.4- Modélisation de la configuration de l'usine du site n° 3

I.4.1- Définition des lignes de production pour le site n°3

A partir du synoptique de l'installation de traitement du site n° 3 (Fig.39), 28 lignes de production sont définies. Le nombre de lignes de production, pour les 5 classes granulométriques potentiellement produites sur le site, est présenté dans le tableau 46. Le détail du modèle de lignes est décrit dans l'annexe 3. De la même manière que pour le site n° 2, différentes configurations ont été simulées les détails des configurations sont décrits en annexe 4.

Tableau 46 : Nombre de ligne de production par classes granulométriques sur le site n°3

Classes granulométriques	Production (%)	Nombre de ligne de production	N° de ligne
0/2	2	8	ligne 1 à 8
0/4	73	8	ligne 9 à 16
4/12,5	9	4	ligne 17 à 20
4/22,4	16	4	ligne 21 à 24
20/80	0	4	ligne 25 à 28

I.4.2- Test des différentes configurations de production pour le site n°3

Sur la base des différentes configurations présentées dans le premier paragraphe, des simulations avec l'outil CADUR sont ensuite effectuées afin d'une part, de tester la sensibilité du modèle à ces différentes configurations et, d'autre part, de poursuivre la validation du modèle par comparaison avec les consommations réelles sur le site n°3. Dans cette optique toutes les configurations envisagées sont testées afin de constater la sensibilité du modèle.

Ainsi, quelque soit la configuration considérée (Tableau 47), on constate une variabilité importante des demandes énergétiques, calculées par l'outil CADUR, d'une classe granulaire à une autre ; qui s'étend jusqu'à un facteur 3,8. Une certaine régularité peut être observée par type de granulats. A titre d'exemple, la consommation spécifique pour le 0/2 (entre 4,62 et 5,58 kWh.t⁻¹) est au minimum 3 fois supérieure à celle obtenue pour le 0/4 qui, quelque soit la configuration choisie, est comprise entre 1,28 et 2,24 kWh.t⁻¹. A l'inverse, les prédictions se révèlent être très dépendantes de la configuration retenue pour les fractions 4/12,5 et 4/22,4. Enfin, même si ce site peut produire, grâce aux équipements installés, la fraction 20/80, aucune production de cette classe granulométrique n'a été répertoriée au cours des années étudiées (2004 et 2005).

Tableau 47 : Consommations électriques sur le site n°3, calculées par CADUR, selon les différentes configurations

	Année 2005	configuration n°1	configuration n°2	configuration n°3	configuration n°4	configuration n°5
Estimations CADUR	0/2 (kWh.t ⁻¹)	4,62	4,69	4,94	5,47	5,58
	0/4 (kWh.t ⁻¹)	1,28	1,35	1,59	2,13	2,24
	4/12,5 (kWh.t ⁻¹)	2,78	5,19	2,71	3,6	3,29
	4/22,4 (kWh.t ⁻¹)	2,26	4,67	2,2	3,08	2,77
	20/80 (kWh.t ⁻¹)	0	0	0	0	0
	Consommations totales (kWh)	105 370	147 391	119 327	159 556	159 556
Fournies par l'exploitant	Consommations 2005 (kWh)	135 189				

Dans la suite du document, les valeurs présentées correspondent à celles déterminées avec la configuration n°3 qui semble être un bon compromis de distribution des lignes de production.

I.5- Bilan sur la saisie des lignes de production et de leur configuration

La durée nécessaire à une évaluation globale des modèles implémentés dans l'outil CADUR, est principalement imputable à l'entrée de l'ensemble des données nécessaires. Cette première étape peut varier entre 2 et 6 heures en fonction notamment du nombre de lignes de production potentielles et de leur complexité respective. En effet, la configuration d'un site relativement simple (site n°3) prendra moins de temps qu'un site beaucoup plus complexe. A titre de comparaison, le temps nécessaire à l'instruction du site n°2, qui présente 58 lignes de production potentielles, est plus élevé que celui du site n°1 qui n'est composé que 11 lignes de production. De la même manière, le nombre d'équipements constituant l'installation de traitement des matériaux est un facteur très important dans la durée de saisie des données d'entrée.

II- Simulations avec le modèle Energie

II.1- Résultats des consommations énergétiques pour le site n°3

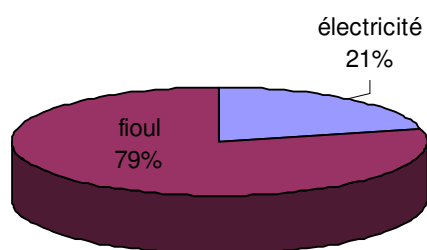
L'ensemble des paramètres d'entrée nécessaires aux calculs des consommations énergétiques et à leur validation ont pu être recueillis pour le site n°3 (chapitre II). Les données de production et la proportion respective de chacune des classes granulométriques produites, le nombre de jours de production (210 jours sur 2004 et 2005 pour 7 heures quotidiennes de production), la désignation et les caractéristiques des différents engins de carrière et équipements présents sont disponibles. L'ensemble de ces données permet donc, à partir des différentes configurations envisagées pour l'usine d'élaboration de valider les prédictions qui sont présentées ci-après pour chaque site.

Le tableau 48 présente les simulations réalisées pour les années 2004 et 2005 pour lesquelles les productions et le nombre de jours de production ont été fixés par rapport aux données fournies par l'exploitant. Les résultats mettent en évidence des écarts entre les CESP électriques et les CESP fioul pour les différentes fractions granulométriques.

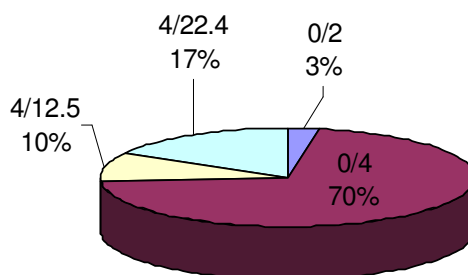
Tableau 48 : Valeurs des CESP calculées par CADUR, par classes granulaires pour le site n°3

	Produit	CESP électrique (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)	CESP Totale (kWh.t ⁻¹)	Consommations électriques totales (kWh)	Consommations de fioul totales (kWh)
2004	0/2	4,11	5,75	9,86	131 259	487 929
	0/4	1,33	5,75	7,08		
	4/12.5	2,26	5,75	8,01		
	4/22.4	1,83	5,75	7,58		
2005	0/2	4,94	6,91	11,85	119 327	443 572
	0/4	1,59	6,91	8,50		
	4/12.5	2,71	6,91	9,62		
	4/22.4	2,20	6,91	9,11		

La figure 71 illustre la distribution de l'énergie consommée pour le site 3 par type de sources : on constate la faible part de consommation électrique (Fig.71a). La figure 71b montre que c'est le 0/4 qui consomme le plus d'énergie sur ce site.



a) par type de source



b) par classe granulaire

Fig. 71 : Répartition de l'énergie consommée sur le site n° 3 en 2004 et 2005

Hormis la part respective des énergies consommées sur le site n°3, une validation du modèle a été recherchée en examinant les différentes énergies par tonne de granulats produite sans distinction de classes granulométriques. Le tableau 49 compare les valeurs des différentes CESP moyennes (toutes classes granulométriques confondues) issues des données exploitant (chapitre II) et celles obtenues grâce au modèle Énergie. On constate que les valeurs de CESP fournies par l'outil développé présentent des écarts globalement inférieurs de - 15% pour l'électricité et inférieures à + 1,5% pour les consommations de fioul. L'écart des CESP totales étant de - 2.6 %.

Tableau 49 : Comparaison des valeurs de CESP estimées et réelles pour le site n°3 (configuration 3)

	CESP électricité (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)	CESP totale (kWh.t ⁻¹)
<i>Données réelles de l'exploitant</i>			
2004	1,83	5,67	7,50
2005	2,10	6,90	9,00
<i>Données calculées par CADUR</i>			
2004	1,55	5,75	7,30
2005	1,86	6,91	8,77
<i>Ecart (%)</i>			
2004	-15,30	1,45	-2,67
2005	-11,43	0,08	-2,56

Les fortes valeurs d'écarts relatifs observées pour l'énergie électrique peuvent s'expliquer par la non prise en compte des consommations générées par la centrale de recomposition. En effet, cette installation peut être considérée comme un système à part entière. Les valeurs de production fournies par l'exploitant ne mentionnent pas le sable recomposé. Toutefois, si on considère que cette installation de recomposition fonctionne selon les mêmes durées que l'installation de traitement et d'élaboration des granulats, à savoir 210 jours sur 2 ans à raison de 7 heures par jour, l'outil CADUR donne, pour la centrale de recomposition du site n°3, une consommation annuelle en électricité de 15 139 kWh pour 2004 et de 13 763 kWh pour l'année 2005.

De plus, l'origine des écarts peut également être due à la non prise en compte des installations annexes (locaux incluant l'éclairage et le chauffage par exemple). Une étude réalisée par l'exploitant montre une consommation électrique sur le site n°3 de 35 kWh le week-end soit 1 820 kWh annuellement.

En ajoutant ces hypothèses, de nouveaux calculs ont été réalisés et le tableau 50 montre les valeurs des CESP corrigées. On constate, ainsi, une diminution significative des écarts de consommations électriques. En effet, ces derniers passent de -13.5 % à seulement -2.19 % en moyenne pour 2004 et 2005. De ce fait, le modèle « énergie » de l'outil développé permet d'estimer les demandes énergétiques globales pour élaborer une tonne de granulats sur le site n°3 avec une erreur relative de l'ordre du dixième de kWh.

Tableau 50 : Comparaison des valeurs des CESP corrigées pour le site n°3

	CESP électricité (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)	CESP totale (kWh.t ⁻¹)
<i>Données réelles de l'exploitant</i>			
2004	1,83	5,67	7,50
2005	2,10	6,90	9,00
<i>Données calculées par CADUR</i>			
2004	1,75	5,75	7,50
2005	2,10	6,91	9,01
<i>Ecart (%)</i>			
2004	-4,37	1,45	0,00
2005	0,00	0,08	0,11

II.2- Résultats des consommations énergétiques pour le site n°1

Concernant les données d'entrée de production, aucune donnée mensuelle n'a pu être obtenue. Toutefois, la production annuelle du site n°1 est de 180 000 tonnes à hauteur de 1 000 tonnes journalières. Ainsi, ce sont 15 000 tonnes qui ont été renseignées comme valeur de production mensuelle en 15 journées de travail. De plus, plusieurs conditions de production ont été envisagées dans le but d'observer l'influence du choix du procédé d'élaboration des matériaux sur un même site. Ainsi, le tableau 51 indique les CESP par classes granulaires (Martaud *et al*, 2007). L'hypothèse est faite que l'ensemble des matériaux est produit à 100 % par les lignes « directes ».

Tableau 51 : Résultats de simulation pour le site n°1 en lignes directes

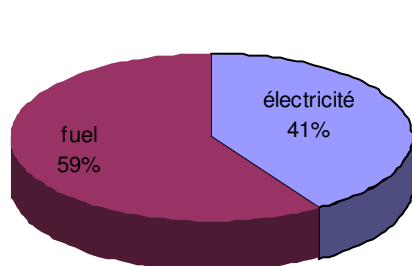
	CESP électricité (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)	CESP totale (kWh.t ⁻¹)
0/31,5 P	0,78	4,19	4,97
<6.30	2,22	4,19	6,41
10/14	3,00	4,19	7,19
6,3/10	3,16	4,19	7,35
4/6,30	3,16	4,19	7,35
0/4	3,16	4,19	7,35

Le tableau 52 présente, quant à lui, les différentes demandes spécifiques dans les conditions usuelles de production du site n°1, à savoir que la fraction 0/31,5 P est élaborée à 100 % sur la ligne de production 1, la fraction < 6,3 à 100 % par la ligne 2, le 10/14 à 85 % par la ligne 3 et 15% par la ligne 4, et enfin les autres fractions sont produites à hauteur de 70 % par la ligne 5, 10 % pour les 7,8 et 11.

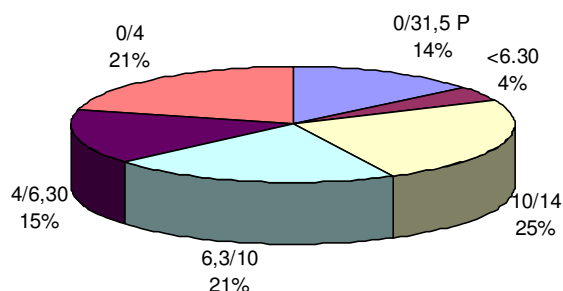
Tableau 52 : Résultats de simulation pour le site n°1 en conditions de production usuelles

	CESP électricité (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)	CESP totale (kWh.t ⁻¹)
0/31,5 P	0,78	4,19	4,97
<6.30	2,22	4,19	6,41
10/14	2,97	4,19	7,16
6,3/10	3,79	4,19	7,98
4/6,30	3,79	4,19	7,98
0/4	3,79	4,19	7,98

De cette façon, les conséquences directes de la recirculation des matériaux au sein de l'usine d'élaboration des matériaux peuvent être observées avec notamment une augmentation de près de 20 % des consommations électriques pour les fractions 6,3/10, 4/6,3 et 0/4. Par ailleurs, le modèle Énergie calcule, pour le site n°3, une consommation annuelle de 524 891 kWh d'électricité et de 753 656 kWh de fioul, soit respectivement 41 et 59 % des consommations globales (Fig.72) (Martaud *et al.*, 2008).



a) par type de source



b) par classe granululaire

Fig. 72 : Répartition de l'énergie consommée sur le site n°1

II.3- Résultats des consommations énergétiques pour le site n°2

Comme pour le site n°3, les résultats présentés ci-après ont été obtenus avec la configuration n°3 qui semble être celle la plus réaliste à la vue des informations recensées. Le tableau 53 présente ainsi les valeurs de CESP (électrique et fioul) pour l'ensemble des classes granulométriques produites sur le site n°2 pour les deux années considérées dans cette étude. On constate que les valeurs obtenues en 2005 sont systématiquement plus élevées que celles de 2004.

Tableau 53 : Valeurs des CESP calculées par CADUR par classes granulaires sur le site n°2 (configuration n°3)

	Produit	CESP électrique (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)	CESP Totale (kWh.t ⁻¹)	Consommations électriques totales (kWh)	Consommations de fioul totales (kWh)
2004	0/2	3,54	5,5	9,04	563 676	986 362
	0/4 f	2,53	5,5	8,03		
	0/4 sc	4,56	5,5	10,06		
	2/6	1,06	5,5	6,56		
	4/12,5	2,15	5,5	7,65		
	8/20	2,89	5,5	8,39		
2005	0/2	5,58	8,75	14,33	624 204	1 092 280
	0/4 f	3,98	8,75	12,73		
	0/4 sc	7,20	8,75	15,95		
	2/6	1,67	8,75	10,42		
	4/12,5	3,39	8,75	12,14		
	8/20	4,56	8,75	13,31		

Comme pour le site n°3, les valeurs de consommations énergétiques par classes granulométriques sont connues sur le site n°2 (cf chapitre II). De fait, les résultats obtenus par le modèle CADUR peuvent être comparés aux données fournies par l'exploitant. Le tableau 54 présente les résultats obtenus. On observe des écarts importants, notamment pour l'année 2004 qui présente une large sous estimations des consommations électriques (-54,19 %) et une sur estimation des consommations de fioul (31,83 %) pour une consommation totale qui montre une erreur de près de 25 %.

Tableau 54 : Comparaison des valeurs de CESP estimées et réelles pour le site n°2

	CESP électricité (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)	CESP totale (kWh.t ⁻¹)
<i>Données réelles de l'exploitant</i>			
2004	6,92	4,21	11,13
2005	5,82	8,61	14,43
<i>Données calculées par CADUR</i>			
2004	3,17	5,55	8,72
2005	5,00	8,75	13,75
<i>Ecart (%)</i>			
2004	-54,19	31,83	-21,65
2005	-14,09	1,63	-4,71

De la même manière que le site n°3, diverses corrections peuvent être appliquées à ces premiers résultats. En effet, en intégrant la centrale de reconstitution et en se basant sur le même nombre de jour de production, on obtient les résultats suivants.

Tableau 55 : Comparaison des valeurs des CESP corrigées pour le site n°2

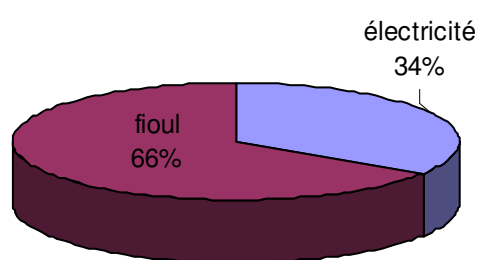
	CESP électricité (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)	CESP totale (kWh.t ⁻¹)
<i>Données réelles de l'exploitant</i>			
2004	6,92	4,21	11,13
2005	5,82	8,61	14,43
<i>Données calculées par CADUR</i>			
2004	3,44	5,55	8,99
2005	5,43	8,75	14,18
<i>Ecart (%)</i>			
2004	-50,29	31,83	-19,23
2005	-6,70	1,63	-1,73

On constate des écarts relativement importants pour les valeurs de 2004. A la vue de ces résultats, l'exploitant a été consulté afin d'en déterminer les origines. Ces erreurs importantes d'évaluation peuvent s'expliquer par le fait, qu'en 2004 :

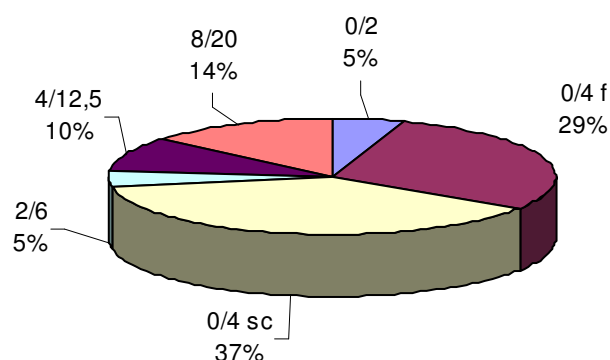
- l'installation de traitement a subi de très nombreuses pannes et donc des arrêts et des redémarrages successifs,

- afin de compenser ces arrêts à répétition, le nombre d'heures de fonctionnement journalier a été augmenté mais pas de façon régulière. De la même manière, un accroissement des cadences de production a été réalisé sans pour autant que ce dernier ne soit modélisable de part sa variabilité trop importante et irrégulière.

Quelle que soit l'année considérée, on constate que la majorité de l'énergie consommée sur le site n°2, est sous forme de fioul (Fig.73a) et est imputable à la fraction 0/4 (Fig.73b) ce qui est logique car étant la classe granulométrique majoritairement élaborée sur l'exploitation.



a) par type de source



b) par classe granulaire

Fig. 73 : Répartition de l'énergie consommée sur le site n°2 en 2004 et 2005

II.4- Synthèse des simulations de consommation d'énergie pour les trois sites

Le tableau 56 rassemble pour l'ensemble des sites, les valeurs de CESP électrique et fioul calculées. Pour les sites étudiés, les plages de CESP s'étendent entre 1,75 et 5,43 kWh.t⁻¹ pour l'électricité et 4,19 et 8,75 kWh.t⁻¹ en fioul. Quelque soit le site, il ressort que la CESP fioul est très supérieure à la CESP électrique. Ensuite il apparaît que d'une année sur l'autre les CESP fluctuent : une augmentation de CESP électrique est pour les sites n°2 et n°3 associée à une augmentation de CESP fioul. Les explications complémentaires de l'exploitant ne permettent pas d'éclaircir ce point. Par ailleurs, la gamme des CESP s'étend du simple au triple, ce qui est un résultat important.

Tableau 56 : Synthèse des valeurs de CESP calculées

Site	Année	production (t)	CESP électrique (kWh.t ⁻¹)	CESP fioul (kWh.t ⁻¹)
1	2004	180000	2,92	4,19
2	2004	177720	3,44	5,5
	2005	124805	5,43	8,75
3	2004	84825	1,75	5,75
	2005	64233	2,1	6,91

III- Simulations avec le modèle rejets atmosphériques

On rappelle que les calculs de rejets atmosphériques réalisés par l'outil développé sont basés sur des facteurs unitaires de rejets, fonction de la puissance et de l'âge de l'engin. Ces facteurs correspondent aux facteurs limites d'émissions fixés par la réglementation en vigueur (cf chapitre III). Aucune mesure de gaz d'échappement de différents engins de carrière n'ayant pu être réalisées au cours de ce travail, les valeurs estimées par l'outil CADUR ne peuvent donc pas être validées. Par suite la présentation des résultats de simulation est réalisée ci-après par numéro de site.

III.1- Simulations des émissions atmosphériques sur le site n°1

Sur le site n°1, deux sources d'émissions atmosphériques peuvent être recensées. En effet, outre les engins classiquement rencontrés sur une exploitation de carrières, les granulats élaborés sur le site n°1 sont issus de roches massives rendant indispensable l'utilisation d'explosifs.

III.1.1- Calculs des rejets dus à l'utilisation des engins

A partir de ces paramètres d'entrée, les émissions vers le compartiment atmosphère ont, en premier lieu, été estimées au niveau de chaque poste. Les résultats ainsi obtenus, sont présentés dans le tableau 57 pour ce qui concerne les gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ et N₂O), dans le tableau 58 pour les polluants organiques, les particules solides et l'ammoniac et dans le tableau 59 pour les émissions de métaux lourds.

Tableau 57 : Émissions de gaz à effet de serre et de gaz toxiques

Poste	Engins par poste	Gaz à effet de serre			Gaz toxiques		
		CO ₂ (g.t ⁻¹)	CH ₄ (g.t ⁻¹)	N ₂ O (g.t ⁻¹)	NOx (g.t ⁻¹)	SO ₂ (g.t ⁻¹)	CO (g.t ⁻¹)
Foration	1 engins	149,13	1,10E-02	7,70E-02	1,32	2,06E-01	7,70E-01
Extraction	2 engins	589,75	1,53E-01	1,07	22,37	9,19E-01	12,59
Déstockage	2 engins	406,73	1,17E-01	8,22E-01	26,39	8,46E-01	8,5
Total	5 engins	1,15E+03	2,81E-01	1,97	50,08	1,97	21,86

Tableau 58 : Émissions de polluants organiques, de particules solides et d'ammoniac

Poste	Engins par poste	Organiques		Particules solides		Ammoniac
		COVNM (g.t ⁻¹)	POP (g.t ⁻¹)	PM _{2,5} (g.t ⁻¹)	PM ₁₀ (g.t ⁻¹)	NH ₃ (g.t ⁻¹)
Foration	1 engins	2,20E-01	1,55E-04	4,27E-02	1,32E-03	4,40E-04
Extraction	2 engins	3,44	6,14E-04	1,01	3,12E-02	6,11E-03
Déstockage	2 engins	2,13	4,23E-04	1,23	3,80E-02	4,70E-03
Total	5 engins	5,79	1,19E-03	2,28	7,05E-02	1,13E-02

Tableau 59 : Émissions de métaux lourds

Poste	Engins par poste	Métaux lourds					
		Cadmium (g.t ⁻¹)	Cuivre (g.t ⁻¹)	Chrome (g.t ⁻¹)	Nickel (g.t ⁻¹)	Sélénium (g.t ⁻¹)	Zinc (g.t ⁻¹)
Foration	1 engins	4,68E-07	7,95E-05	2,34E-06	3,27E-06	4,68E-07	4,68E-05
Extraction	2 engins	1,84E-06	3,14E-04	9,25E-06	1,30E-05	1,84E-06	1,84E-04
Déstockage	2 engins	1,27E-06	2,17E-04	6,37E-06	8,93E-06	1,27E-06	1,28E-04
Total	5 engins	3,58E-06	6,11E-04	1,80E-05	2,52E-05	3,58E-06	3,59E-04

D'un point de vue global on observe que le poste « foration » présente des valeurs très largement inférieures aux deux autres postes. Ceci s'explique par une utilisation moindre de la foreuse vis-à-vis des autres engins. Concernant les postes « extraction » et « déstockage », leurs émissions respectives sont globalement du même ordre de grandeur même s'il est possible d'accorder une part plus importante à l'extraction exception faite des émissions de NOx et de poussière pour lesquelles les engins affectés au déstockage et/ au chargement client présentent des valeurs plus élevées.

III.1.2- Calculs des rejets dus à l'utilisation des explosifs

Concernant les quantités d'explosifs utilisées sur une année, elles ont été obtenues à partir des plans de tirs décrits au chapitre II. Ainsi, 1 475 kg de dynamites Dynaroc 9, 975 kg d'émulsion Nitram 9, 2075 kg de nitrate fioul Nitral et 2075 kg de nitrate fioul Nitro D8 ont été nécessaires à l'abattage de 19 201 m³ de roches soit 55 184 t de roches. De ce fait, les valeurs d'entrée dans le modèle pour le site n°1 qui produit 180 000 t annuellement sont les suivantes : 3 218 kg de Nitram 9, 6849 kg de Nitral et de Nitro D8. Le tableau 60 rassemble les émissions atmosphériques par l'utilisation d'explosifs, lors des tris d'abattage, sur le site n°1 (Martaud *et al.*, 2007). On observe très clairement que ces émissions sont beaucoup moins importantes, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif, que celles imputables aux engins de carrière (tableau 57, 58, 59).

Près de 80 % de celles-ci se composent de vapeur d'eau et d'azote et donc de ce fait, ne vont avoir que peu voire pas d'impacts négatifs sur l'environnement (chapitre I). Cependant, il est important de rappeler que les émissions dues à l'utilisation de dynamites ne sont pas estimées dans l'outil CADUR (cf chapitre III).

Tableau 60 : Émissions atmosphériques générés lors des tirs d'abattage sur le site n°1

	CO ₂ (g.t ⁻¹)	NO (g.t ⁻¹)	CO (g.t ⁻¹)	NH ₃ (g.t ⁻¹)	H ₂ (g.t ⁻¹)	H ₂ O (g.t ⁻¹)	O ₂ (g.t ⁻¹)	N ₂ (g.t ⁻¹)	Oxyde d'aluminium (g.t ⁻¹)
Nitram 9	1,89	0	7,46E-01	1,05E-01	8,01E-02	8,19	0	4,41	1,91
Nitral	4,51	1,06E-01	1,38E-01	1,94E-03	1,27E-02	17,54	5,11E-02	12,05	2,61
Nitro D8	6,33	1,14E-02	1,37E-01	2,59E-02	1,13E-02	18,95	2,43E-03	12,56	0
Total	12,73	1,17E-01	1,02	1,33E-01	1,04E-01	44,68	5,35E-02	29,02	4,52

III.2 – Simulation des émissions atmosphériques sur le site n°2

Contrairement au site n°1 pour lequel deux sources d'émissions (engins, explosifs) vers l'atmosphère ont été recensées, il existe une origine unique de rejets atmosphériques sur le site n°2 : l'utilisation des engins de chantiers. Les tableaux 61, 62 et 63 présentent les résultats obtenus pour le site n°2.

Tableau 61 : Émissions de gaz à effet de serre et de gaz toxiques

Poste	Engins par poste	Gaz à effet de serre			Gaz toxiques		
		CO ₂ (g.t ⁻¹)	CH ₄ (g.t ⁻¹)	N ₂ O (g.t ⁻¹)	NO _x (g.t ⁻¹)	SO ₂ (g.t ⁻¹)	CO (g.t ⁻¹)
Autres	3 engins	817,33	1,31E-01	9,20E-01	10,69	1,86	9,69
Extraction	2 engins	1003,73	2,28E-01	1,60	27,42	1,46	15,99
Déstockage	1 engins	573,56	1,24E-01	8,70E-01	14,91	7,32E-01	8,7
Total	6 engins	2,39E+03	4,84E-01	3,39	53,02	4,05	34,38

Tableau 62 : Émissions de composés organiques, de particules solides et d'ammoniac

Poste	Engins par poste	Organiques		Particules solides		Ammoniac
		COVNM (g.t ⁻¹)	POP (g.t ⁻¹)	PM _{2,5} (g.t ⁻¹)	PM ₁₀ (g.t ⁻¹)	NH ₃ (g.t ⁻¹)
Autres	3 engins	7,36E+00	8,51E-04	8,20E-01	2,54E-02	2,56E-04
Extraction	2 engins	4,57	1,05E-03	8,87E-01	2,74E-02	3,15E-04
Déstockage	1 engins	2,49	5,97E-04	4,82E-01	1,49E-02	1,80E-04
Total	6 engins	14,42	2,49E-03	2,19	6,77E-02	7,51E-04

Tableau 63 : Emissions de métaux lourds

Poste	Engins par poste	Métaux lourds					
		Cadmium (g.t ⁻¹)	Cuivre (g.t ⁻¹)	Chrome (g.t ⁻¹)	Nickel (g.t ⁻¹)	Sélénium (g.t ⁻¹)	Zinc (g.t ⁻¹)
Autres	3 engins	5,25E-03	2,56E-06	4,36E-04	1,28E-05	1,79E-05	2,56E-06
Extraction	2 engins	9,14E-03	3,15E-06	5,35E-04	1,57E-05	2,20E-05	3,15E-06
Déstockage	1 engins	4,97E-03	1,80E-06	3,06E-04	8,99E-06	1,26E-05	1,80E-06
Total	6 engins	1,94E-02	7,51E-06	1,28E-03	3,75E-05	5,26E-05	7,51E-06

On observe que le poste extraction est très largement le poste générateur d'émissions atmosphériques. En effet, malgré que le nombre d'engin de ce dernier corresponde au tiers des engins recensés sur le site n°2, quelque soit l'émission considérée, le poste extraction représente près de la moitié des émissions totales.

III.3- Simulations des émissions atmosphériques sur le site n°3

Trois des six engins recensés sur le site n°3 ont une date de mise en circulation antérieure à celle autorisée dans l'outil CADUR (1988). Les résultats obtenus, présentés ci-dessous, sont de ce fait, minimisés car les années de mise en circulation des engins concernés ont été renseignées comme étant de 1988. Les émissions des gaz à effet de serre, des gaz toxiques, de polluants organiques, de particules solides, d'ammoniac et de métaux lourds sont respectivement reportées dans les tableaux 64, 65 et 66. Quelle que soit l'émission considérée, on constate que les postes « extraction » et « déstockage » présentent des valeurs globalement du même ordre de grandeur malgré un nombre d'engins deux fois moins important au poste de déstockage.

Tableau 64 : Émissions de gaz à effet de serre et de gaz toxiques

Engins	Références	Gaz à effet de serre			Gaz toxiques		
		CO ₂ (g.t ⁻¹)	CH ₄ (g.t ⁻¹)	N ₂ O (g.t ⁻¹)	NOx (g.t ⁻¹)	SO ₂ (g.t ⁻¹)	CO (g.t ⁻¹)
Déstockage	2 engins	967,96	1,20E-01	8,43E-01	16,89	1,65	8,49
Extraction	4 engins	921,42	1,07E-01	7,46E-01	23,81	2,62	9,09
Total	6 engins	1,89E+03	2,27E-01	1,59	40,7	4,27	17,58

Tableau 65 : Émissions de polluants organiques, de particules solides et d'ammoniac

Engins	Références	Organiques		Particules solides		Ammoniac
		COVNM (g.t ⁻¹)	POP (g.t ⁻¹)	PM _{2,5} (g.t ⁻¹)	PM ₁₀ (g.t ⁻¹)	NH ₃ (g.t ⁻¹)
Déstockage	2 engins	2,36	1,01E-03	6,21E-01	1,92E-02	4,82E-03
Extraction	4 engins	2,48	9,60E-04	1,66	5,13E-02	4,26E-03
Total	6 engins	4,84	1,97E-03	2,28	7,05E-02	9,08E-03

Tableau 66 : Émissions de métaux lourds

Engins	Références	Métaux lourds					
		Cadmium (g.t ⁻¹)	Cuivre (g.t ⁻¹)	Chrome (g.t ⁻¹)	Nickel (g.t ⁻¹)	Sélénium (g.t ⁻¹)	Zinc (g.t ⁻¹)
Déstockage	2 engins	3,04E-06	5,16E-04	1,52E-05	2,12E-05	3,04E-06	3,04E-04
Extraction	4 engins	2,88E-06	4,91E-04	1,44E-05	2,02E-05	2,88E-06	2,88E-04
Total	6 engins	5,92E-06	1,01E-03	2,96E-05	4,14E-05	5,92E-06	5,92E-04

III.4- Analyse des émissions de gaz à effet de serre par engin pour les sites

Les résultats présentés ci-après ne concernent que les émissions de gaz à effet de serre afin de synthétiser les apports du modèle. Les autres familles de rejets ont également été estimées et leurs valeurs respectives ont été reportées en annexe 6.

Les données d'entrée des engins sont recensées dans le tableau 67 pour le site n°1.

Tableau 67 : Rappel des données d'entrée des engins du site n°1

Engin	Année de mise en circulation	puissance (kW)	Consommation (l.h ⁻¹)	Heures travaillées entre 7 et 20h	Poste de travail
Foreuse <i>Tamrock 1100</i>	2002	220	55	1	foration
Dumper <i>R350 trx</i>	2001	238	11,8	7,5	extraction
Pelle <i>JCP 330</i>	1999	169	17	7,5	extraction
Chargeur <i>Caterpillar 950 F</i>	1997	134	14,48	7,5	chargement client (déstockage)
Tombereau <i>Perlini</i>	1990	179	5,78	7,5	déstockage

Les contributions respectives de chaque engin de carrière du site n°1, aux émissions de gaz à effet de serre sont présentées dans la figure 74, ceux du site n°2 sur la figure 75 et figure 76 pour le site n°3. Par rapport à ces graphiques qui montrent des différences importantes des contributions respectives d'un site à l'autre pour certains engins (ex la pelle qui contribue de 3% à 30% tous gaz confondus) on note que le ou les chargeurs contribuent en majorité à ces émissions. Compte tenues des hypothèses de calcul liées aux émissions unitaires, là encore ce sont les caractéristiques propres aux engins de chaque site qui vont être prépondérantes sur l'évaluation globale.

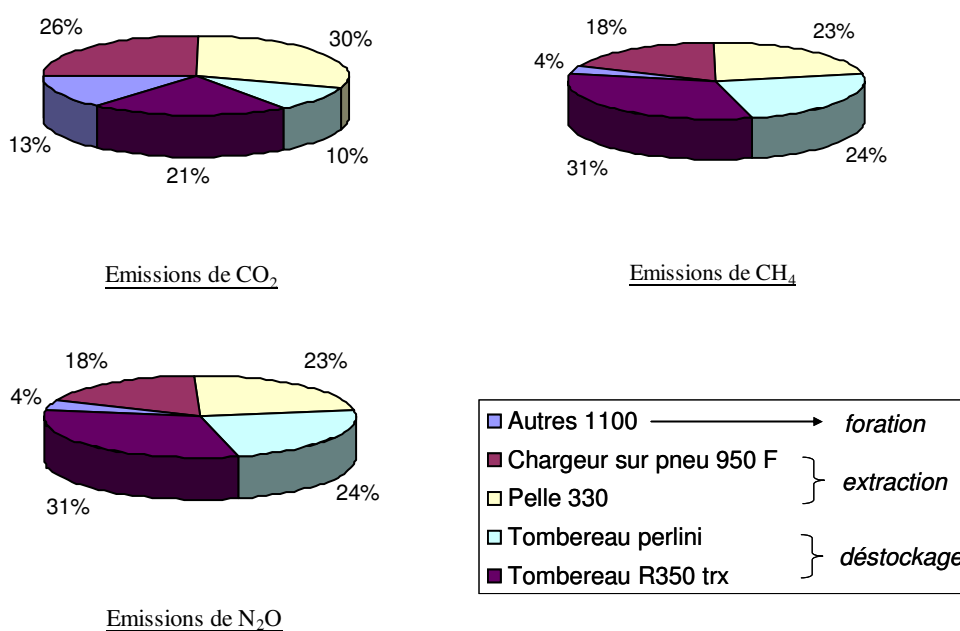


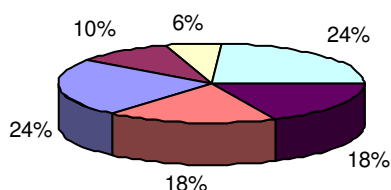
Fig. 74 : Répartition des émissions de gaz à effets de serre sur le site n°1

Les données d'entrée des engins sont recensées dans le tableau 68 pour le site n°2.

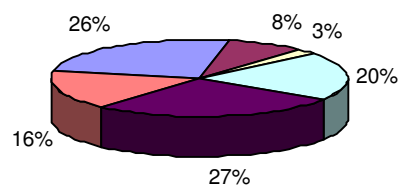
Tableau 68 : Rappel des données d'entrée des engins du site n°2

Engin	Référence	Année de mise en circulation	Puissance (kW)	Consommation (l.h ⁻¹)	Heures travaillées entre 7 et 20 h	Poste de travail
Chargeur sur pneu	L 180 E	2005	235	20	8	Déstockage
Chargeur sur pneu	L180C	1998	198	23	3	Autres
Pelle	432D	2004	67	13	3	Autres
Pelle	EC360	2004	184	20	8	Extraction
Tombereau	A 30	2002	248	15	8	Extraction
Autres	D6 LGP	2007	149	15	8	Autres

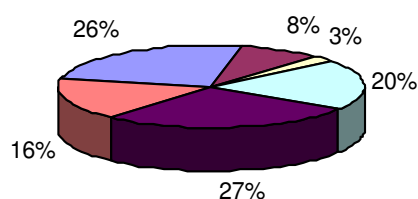
Les contributions respectives de chaque engin de carrière du site n°2, aux émissions de gaz à effet de serre sont présentées dans la figure 75. Elle confirme les premières observations constatées au niveau des rejets par poste, à savoir que les engins du poste « extraction » sont majoritairement responsable des émissions atmosphériques générées sur le site n°2.



Emissions de CO₂



Emissions de CH₄



Emissions de N₂O

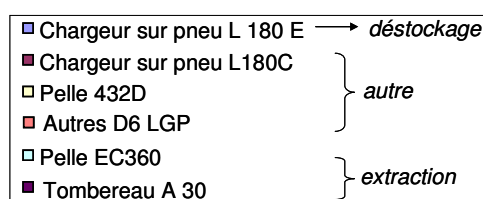


Fig. 75 : Répartition des émissions de gaz à effets de serre sur le site n°2

Les données d'entrée des engins sont recensées dans le tableau 69 pour le site n°3.

Tableau 69 : Rappel des données d'entrée des engins du site n°3

Type	Référence	Année de mise en circulation	Puissance (kW)	Consommation (l.h ⁻¹)	Heures travaillées entre 7 et 20h	Poste de travail
Chargeur sur pneu	966 G	2000	195	29	6,4	déstockage
Chargeur sur pneu	950 F	1992	130	19	2,3	déstockage
Autres	P85	1972	90	14	6,5	extraction
Tombereau	861	1985	135	22	3,4	extraction
Pelle	912	1990	100	15	2,5	extraction
Chargeur sur pneu	Fiat Allis	1982	150	30	0,5	extraction

Les contributions respectives de chaque engin de carrière du site n°3, aux émissions de gaz à effet de serre sont présentées dans la figure 76 qui témoignent de l'importance du chargeur 966 G vis-à-vis des pollutions atmosphériques. En effet, cet engin peut être crédité de la majorité des émissions libérées puisqu'il est responsable de près de 43 % des substances émises. Ceci s'explique par le fait que cet engin, bien qu'il soit le plus récent, présente la puissance et la consommation les plus élevées. Cependant il est important de rappeler que les valeurs obtenues concernant trois des quatre engins recensés au poste « extraction » sont certainement fortement minimisées de part leur âge respectif.

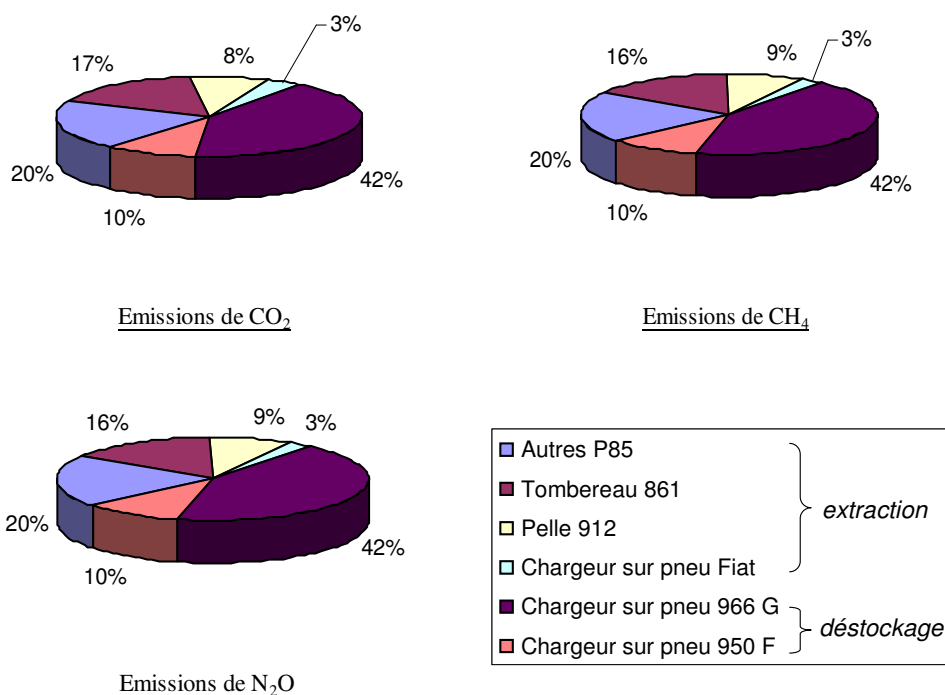


Fig. 76 : Répartition des émissions de gaz à effets de serre sur le site n°3

IV- Simulations avec le modèle Bruit

IV.1 – Prédictions des émissions sonores sur le site n°3

Comme pour le modèle Énergie, l'ensemble des paramètres d'entrée nécessaires aux calculs de niveau sonore a pu être collecté, à savoir le type d'engin ainsi que leur puissance et leur durée de fonctionnement respectives. De plus, comme des campagnes de mesures de bruit ont été réalisées par l'exploitant. Ces dernières ont été effectuées à des distances allant de la centaine de mètres et près de un kilomètre de l'exploitation. Ainsi, le modèle Bruit a pu être validé sur le site n°3. Le tableau 70 présente les écarts observés entre les valeurs obtenues lors de ces campagnes de mesures et celles calculées par CADUR. Il est important de préciser que l'évaluation au point n°1 a été réalisé en ne considérant que les engins inféodés à la zone d'extraction. En effet, de part son emplacement à la limite sud du périmètre autorisé, l'influence des engins imputés au déstockage donc proche des stocks aux environs de l'installation de traitement, a été considérée comme négligeable.

Tableau 70 : Comparaison des valeurs de niveau sonore réelles et calculées par CADUR

Point	Distance (m)	Mesure de protection	Mesure	CADUR	écart (dB(A))	écart (%)
			Leq	Leq		
1	environ 100	aucune protection	56,3	56	-0,3	-0,53
2	350	écran végétal de 30 m d'épaisseur	47,1	46	-1,1	-2,34
3	500	écran végétal de 30 m d'épaisseur	43	43	0,0	0,00
4	750	écran végétal de 30 m d'épaisseur	48,2	39	-9,2	-19,09

On constate que les écarts entre les valeurs mesurées et celles calculées par le modèle Bruit sont relativement faibles (< 2.5%), exception faite du point de mesure n°4 (-20%). Cependant, il est important de noter que bien que ce dernier se situe à 750 m de l'exploitation, les valeurs mesurées sont plus élevées qu'aux points de mesures 2 et 3 pourtant situés à des distances largement inférieures. Par ailleurs, le compte-rendu de mesure associé au point 4 spécifie qu'une pompe à eau était en fonctionnement à environ 100 m du point de mesure et que des véhicules circulaient sur une départementale située à 150 m. Ceci ayant pour conséquence directe de perturber les mesures et plus particulièrement d'augmenter le niveau sonore.

IV.2 – Prédictions des émissions sonores sur le site n°1

Afin d'étudier les indications de niveau sonore sur le site n°1, nous avons choisi de placer arbitrairement différents points de mesure. La figure 77 indique les emplacements sélectionnés à savoir 5 points répartis aux abords de l'exploitation, permettant de couvrir un panorama de 360 ° autour de l'exploitation et un au centre de cette dernière.



*Fig. 77 : Emplacement des points d'estimation de niveau sonore sur le site n°1
(source photo : Google Earth, ©2007)*

Pour chacun des points sélectionnés, les distances vis-à-vis des zones où sont localisés les engins ont été fixées graphiquement. Les résultats obtenus par l'outil CADUR sont reportés dans le tableau 71. On constate que les valeurs obtenues pour les points extérieurs à l'exploitation sont comprises entre 46 et 53 dB(A) et que pour le point n°3, situé au sein de l'exploitation, la valeur est plus élevée (57 dB(A)).

Tableau 71 : Prédictions des niveaux sonores sur le site n°1

	Type de protection	Distance des engins d'extraction (m)	Distance des engins de déstockage (m)	Niveau sonore estimé (dB(A))
1	écran végétal d'au moins 30 m d'épaisseur	500	210	50
2	écran végétal d'au moins 30 m d'épaisseur	560	160	52
3	aucune	250	160	57
4	écran végétal d'au moins 30 m d'épaisseur	270	180	53
5	merlon de 4 m de hauteur	170	590	46
6	écran végétal d'au moins 30 m d'épaisseur	420	390	47

IV.3 – Prédications des émissions sonores sur le site n°2

De la même manière, différents points de mesure ont été placés afin de procéder à une estimation sur le site n°3 (Fig.78) : 3 sont situés au niveau des habitations les plus proches du périmètre de l'exploitation ; Un 4^{ème} point de mesure a été fixé à l'intérieur même de ce périmètre.



Fig. 78 : Emplacement des points d'estimation de niveau sonore sur le site n°2
(source photo : Google Earth, ©2007)

Le tableau 72 présente les distances vis à vis des différentes sources d'émissions sonores (extraction et zone de déstockage), les mesures de protection présentent entre les points de mesure et ces origines et enfin les résultats des estimations obtenues par le modèle implémenté dans l'outil CADUR. On constate que les valeurs obtenues sont faibles et témoignent de la relative faible influence de la carrière en dehors de son périmètre.

Tableau 72 : Prédications sonores sur le site n°2

Point	Distance des engins d'extraction (m)	Mesure de protection vis-à-vis de l'extraction	Distance des engins de déstockage (m)	Mesure de protection vis-à-vis du déstockage	Niveau sonore estimé (dB(A))
1	385	merlon 2 m	850	écran végétal d'au moins 30 m d'épaisseur	46
2	510	écran végétal d'au moins 30 m d'épaisseur	1050	écran végétal d'au moins 30 m d'épaisseur	45
3	620	écran végétal d'au moins 30 m d'épaisseur	1050	écran végétal d'au moins 30 m d'épaisseur	44
4	375	aucun	275	écran végétal d'au moins 10 m d'épaisseur	53

V- Discussion

La figure 79 récapitule les principales caractéristiques entre les sites étudiés. Outre le fait que les données de cette étude permettent d'effectuer une comparaison entre l'exploitation de roches massives et alluvionnaires, elles permettent aussi de comparer des capacités de production qui varient du simple au double dans le cas d'un type de site alluvionnaire. Les résultats obtenus d'après l'analyse des données de site puis d'après la modélisation avec l'outil CADUR sont ainsi commentés afin de dégager des éléments significatifs qui ressortent de ce travail de thèse.

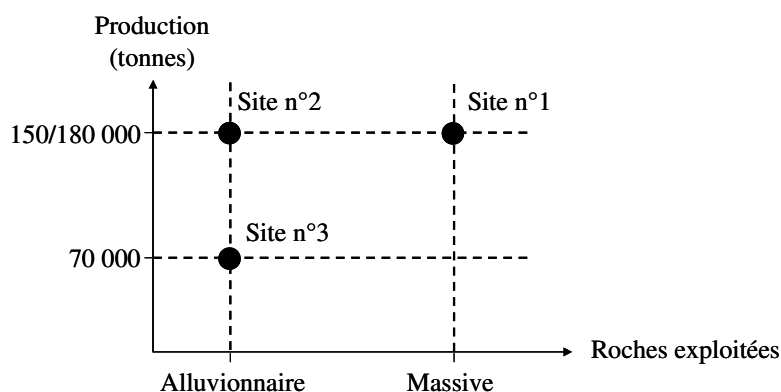


Fig. 79 : Rappel des différences entre les sites étudiés.

V.1- Synthèse des caractéristiques énergétiques des sites étudiés

V.1.1- Comparaison des CESP avec les données de la littérature

Une comparaison avec l'unique donnée de la littérature est proposée dans le tableau 73. On constate tout d'abord que les valeurs des CESP obtenues par l'outil CADUR sont du même ordre de grandeur que celle observées dans les travaux de Stripple (Stripple, 2001). Ensuite, on observe que les valeurs les plus proches des CESP en électricité et en fioul proposées par Stripple sont respectivement celle du site n°2 (valeur la plus élevée) et celle du site n°1 (valeur la plus basse).

Tableau 73 : Comparaison avec des données de la littérature de consommation énergétique

	Site n°1	Site n°2	Site n°3	Stripple, 2001
Consommations électriques (kWh.t ⁻¹)	2,92	5,43	1,92	5,89
Consommations en fioul (kWh.t ⁻¹)	4,19	8,75	6,33	4,7
Consommations totales (kWh.t ⁻¹)	7,11	14,18	8,25	10,59

V.1.2- Comparaison des valeurs de CESP entre les sites

La figure 80 regroupe les valeurs de CESP électriques moyennes déduites des valeurs présentées dans le tableau 56 pour les trois sites. Le site n°1 qui travaille des matériaux plus durs que les deux autres sites et donc pourrait nécessiter plus d'énergie électrique pour les réduire se situe en termes de CESP entre les sites 2 et 3. Ensuite on constate des différences considérables entre les sites 2 et 3 que seule la gamme de production ne peut expliquer. Ainsi la confrontation entre les caractéristiques géotechniques de ces trois roches serait éventuellement à rapprocher des caractéristiques des concasseurs ; or ceux-ci ne représentent qu'une partie des consommations globales de l'installation globale. De fait les résultats de CESP électriques obtenus au cours de ce travail montrent que ce sont les caractéristiques des équipements de l'installation qui prévalent et qu'il n'est pas possible de séparer l'évaluation environnementale du site considéré.

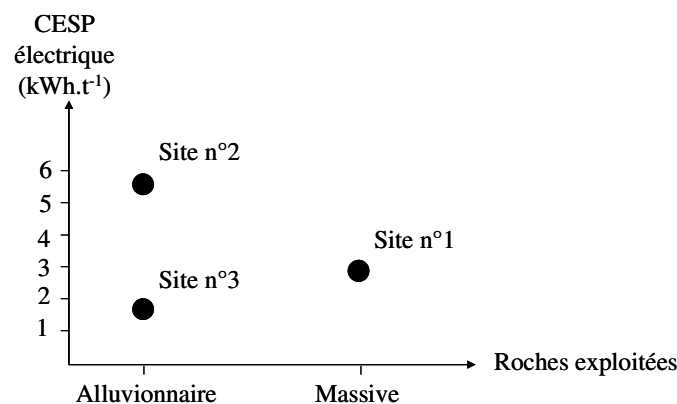


Fig. 80 : Synthèse des consommations électriques moyennes calculées entre les sites étudiés

Afin d'éviter une interprétation erronée, le détail par année de production a été également examiné (Fig.81). Tout d'abord on ne note toujours pas de corrélation des valeurs de CESP électrique. En effet, lorsque :

- on enlève la valeur de 2004 du site n°2 pour laquelle la CESP estimée par le module CADUR présente un écart très important vis-à-vis des valeurs réelles, et en comparant le site n°2 et site n°3, la production double à peine et la CESP triple (1,93 vs 5,43),
- on enlève l'année 2004 du site 2, et en comparant les sites n°1 et 2, on observe que la valeur de CESP du site n°1 (2,92) est 2 fois moins élevée que celle du site n°2 (5,93) malgré une production plus faible,
- on compare les sites n°1 et 3, on observe que malgré une production qui triple quasiment, la valeur de CESP ne double même pas (1,93 vs 2,92).

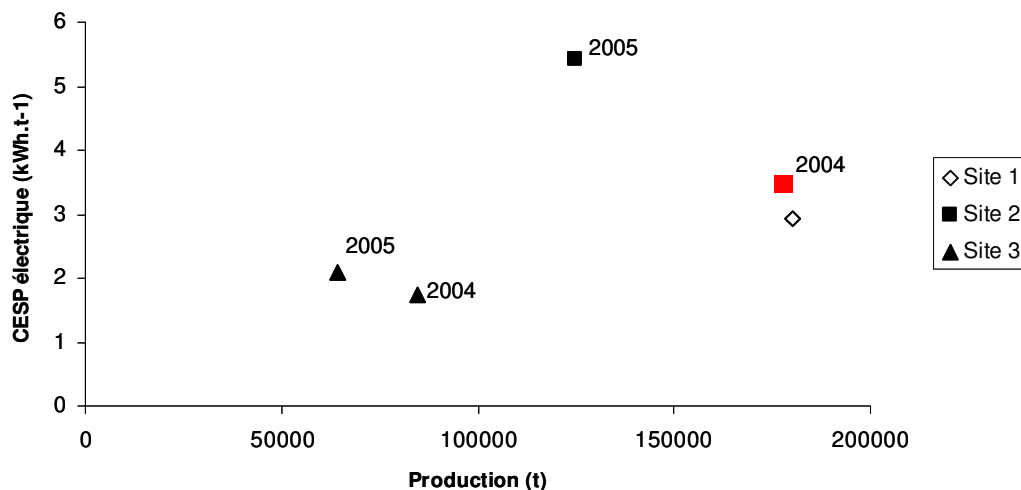


Fig. 81 : Synthèse des consommations électriques calculées par année entre les sites étudiés

La figure 82 présente les consommations de fioul moyennes pour les trois sites. Le classement des sites par ordre de CESP croissant n'est pas le même que pour les CESP électriques. Le site n°1 montre la valeur de CESP en fioul la plus faible. Vient ensuite la valeur du site n°3 puis enfin celle du site n°2. Ce phénomène trouve son explication dans la distance respective entre la zone d'extraction et l'installation de traitement et d'élaboration des matériaux : pour le site n°1, cette distance est inférieure à 1 km ; celle du site n°3 est de l'ordre du kilomètre et celle du site n°2 d'environ 2 kilomètres.

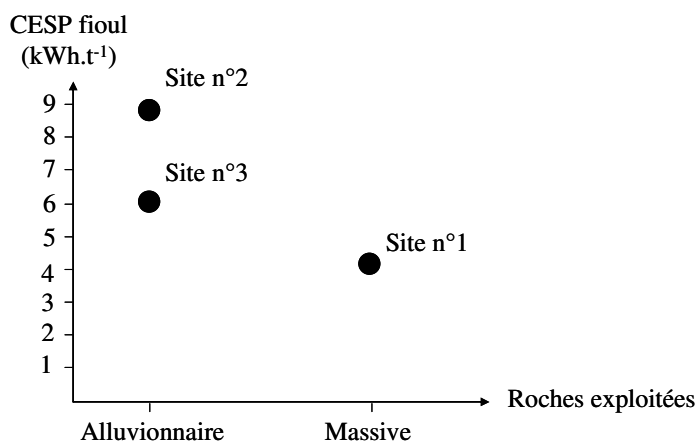


Fig. 82 : Synthèse des consommations de fioul moyennes calculées entre les sites étudiés

V.2- Synthèse des prédictions des rejets atmosphériques des sites étudiés

Du fait du manque de données dans la littérature relatives aux carrières en matière d'indicateurs agrégés, seuls les résultats obtenus dans cette étude sont discutés ici. Une estimation plus globale des gaz à effet de serre calculés par le modèle est proposée (Tableau 74) en utilisant le GWP (IPCC, 2001) afin de synthétiser les connaissances acquises avec l'outil développé. Les coefficients utilisés sont ceux de la figure 17 (chapitre I). Dans cette référence, on rappelle que les NO_x ne sont pas pris en compte en tant que gaz à effet de serre.

Tableau 74 : Prédications de l'indicateur GWP 100 d'après l'outil pour les 3 sites (moyenne pour toutes les classes granulométriques)-engins

Site n°	CO ₂ (g.t ⁻¹)	N ₂ O (g.t ⁻¹)	CH ₄ (g.t ⁻¹)	GWP ₁₀₀ (kg équivalent carbone)
1	1 135	1,97	0,281	1,72
2	2 395	3,39	0,484	3,41
3	1 875	1,59	0,227	2,35

Les valeurs de GWP croissent depuis le site n°1 vers le site n°2 en passant par le site n°3 ce qui est tout fait logique. En effet, le calcul du GWP étant basé sur les résultats d'émissions atmosphériques, il est logique que les valeurs obtenues suivent la même tendance.

V.3- Synthèse des prédictions de bruit des sites étudiés

Aujourd'hui les riverains étant de plus en plus exigeants en matière de nuisances sonores, le dialogue s'en trouve nécessaire entre l'exploitant de carrière et son voisinage. La mise en place de ce type de concertation régulière permet de créer un dialogue mutuel. En effet, dans un contexte de discussion ainsi favorable :

- l'exploitant témoigne de son écoute notamment au travers de différentes réalisations effectuées dans le but d'améliorer le bien-être des populations les plus proches,
- de fait, les riverains sont pour leur part, beaucoup plus compréhensifs vis-à-vis des nuisances générées par la carrière.

En matière de bruit, des tentatives potentielles d'aménagement du site peuvent être proposées via la mise en place de merlons par exemple ; dans ce contexte, le modèle implémenté peut permettre d'estimer l'effet de ce type d'aménagement et d'en discuter les modalités pratiques avec les riverains avant réalisation. En effet, les simulations permettant de caractériser l'effet potentiel des différents aménagements possibles de l'outil CADUR, un compromis entre les prescriptions imposées par l'arrêté préfectoral d'autorisation, les coûts de réalisations et l'intégration visuel dans le territoire de la structure sélectionnée peut être consenti entre les différentes parties. Ainsi, l'emplacement mais également la hauteur de la structure choisie peuvent être fixés.

VI- Conclusion

L'outil développé dans le cadre de ces travaux permet de simuler différents impacts au sens du développement durable. En effet, d'un point de vue environnemental, il est capable d'évaluer les rejets atmosphériques générés lors de la production des matériaux sur un site entièrement paramétrable ; d'un point de vue économique, il fixe les besoins en énergie (combustibles fossiles et électriques) à la fois au niveau de chaque classe granulométrique produite mais aussi au niveau globale de l'exploitation ; enfin, d'un point de vue social, l'outil CADUR permet, d'une part d'apprécier les conséquences, en terme de nuisances sonores, de la mise en place de mesure de protection et d'autre part, de consolider les bonnes relations avec les populations avoisinantes. Par ailleurs, lors d'une demande d'autorisation et/ou de renouvellement d'exploiter un gisement, l'exploitant se doit de constituer un dossier au titre des Installations Classées pour le Protection de l'Environnement.

Dans le cadre de ce dernier, les modèles implémentés dans l'outil CADUR permettent à l'exploitant de pouvoir à la fois définir mais aussi justifier certains choix du process tel que la puissance électrique nécessaire à installer, le nombre et le type d'engins de chantier ou bien encore les aménagements réducteurs des nuisances vis-à-vis de populations extérieures. Au regard des valeurs réelles, on observe que les simulations obtenues par les modèles énergie et bruit, fournissent des informations avec une relative bonne précision concernant les demandes énergétiques et les émissions sonores. L'outil développé permet également de fournir des simulations concernant les rejets atmosphériques générés par l'utilisation des engins de carrière qu'il sera bon de valider dans une prochaine étape de travail. Enfin, on constate que ni la gamme de production ni la nature de la roche ne semble être un paramètre important quant à l'évaluation environnementale de la production de granulats naturels. Il ressort que la configuration même de l'exploitation (distance entre les différentes zones) et son organisation (nombre et type d'engin, process d'élaboration notamment nombre de ligne de production et d'équipements) varient fortement d'un site à l'autre.

Conclusion Générale

Contexte du travail de thèse

Face aux besoins sociétaux en matière de granulats et des impacts positifs associés à l'activité extractive qui en découle, différentes questions peuvent être soulevées. En matière d'environnement et selon le type d'exploitation, une carrière peut engendrer divers impacts liés aux consommations de matières premières, électricité, espace et rejets vers l'air, l'eau ainsi qu'à la production de déchets. Une carrière peut être également à l'origine d'une atteinte aux paysages et engendrer des modifications de la biodiversité du site au cours de l'exploitation et après son réaménagement. Enfin, on ne peut écarter les impacts potentiels locaux sur les personnes au travers de nuisances sonores, de vibrations, de poussières ou bien encore de nuisances visuelles. Une approche globale rigoureuse de l'exploitation de cette ressource est souhaitable afin d'assurer un équilibre entre nos besoins (à des conditions économiques acceptables) et la nécessité de protéger la richesse de notre environnement.

La société actuelle vise à maîtriser ses consommations énergétiques dans un souci non seulement d'économies financières mais aussi de réduction de l'empreinte écologique. La consommation française d'énergie primaire se monte à environ 270 Millions de tonnes équivalent pétrole soit un peu plus de 4 tonnes équivalent pétrole par personne. Plus de la moitié de cette consommation d'énergie se fait de façon indirecte, à travers les produits de consommation courante. Autrement dit, plus de la moitié de l'énergie que nous consommons sert à la production et aux transports des biens et services que nous consommons régulièrement. Il est donc primordial d'essayer de limiter la consommation d'énergie liée à la production et aux transport des matériaux et produits que nous utilisons.

Chaque étape d'une opération d'aménagement, de construction ou de réhabilitation engendre des nuisances sonores inéluctables pour l'environnement immédiat. L'activité humaine génère l'émission de nombreuses substances dans l'atmosphère. Ces dernières diffèrent du point de vue de leur composition chimique, de leur réactivité, de leurs sources d'émission, de leur persistance dans l'environnement, ainsi que de leurs effets. En parallèle la prise en compte des bruits des chantiers dans la dimension environnementale et globalement doit permettre d'atténuer la gêne occasionnée qui est reconnue comme la première nuisance ressentie par les populations.

Rappel de la démarche

Dans ce contexte, en matière d'industrie extractive, nous avons déduit qu'il était pertinent compte tenu des connaissances au début de la thèse de développer en priorité un outil d'évaluation environnementale globale de la production de granulats en carrière. Il nous a paru nécessaire a priori de développer un logiciel d'évaluation entièrement paramétrable et indépendant d'un site à l'autre. Pour cette évaluation les axes retenus pour ce travail de thèse ont porté sur la consommation d'énergie fossile et électrique et sur les émissions à l'atmosphère ainsi que sur les émissions sonores. Un ensemble d'éléments bibliographiques a été collecté et analysé. A partir de modèles physiques et physico-chimiques théoriques ou empiriques, les paramètres environnementaux sélectionnés ont fait l'objet d'une évaluation à l'échelle du site de carrière via un outil dédié qui a été développé complètement au cours de ce travail. Une étude assez poussée de plusieurs sites de carrières, rendue possible grâce aux contacts noués avec la profession, a été menée. Les sites ont été sélectionnés pour leurs natures de roches différentes et leurs gammes de productions extrêmes.

Cette étude a permis à la fois de disposer de données utiles à la construction de l'outil, à la mise en place des modèles implémentés dans l'outil et finalement à l'évaluation de la production de granulats de classes granulométriques différentes. Une étape de validation de l'outil et des modèles énergie et bruits a été conduite. Des recoupements avec les données de production des sites étudiés ont permis de mener à terme cette validation. In fine, l'utilité de disposer d'un tel outil a été montrée par les résultats très différents des simulations de la production de granulats sur différents sites, et sans qu'on puisse à ce stade conclure sur les paramètres de sites (production, type de roche) tels qu'on les envisageait au départ.

Principaux résultats obtenus

L'outil CADUR a pu être entièrement développé et finalisé au cours de ce travail de thèse. Ce nouvel instrument d'évaluation permet de paramétrer intégralement le site de production considéré et d'estimer 3 thèmes environnementaux (maîtrise de l'énergie, lutte contre le changement climatique, environnement et santé) actuellement mis en avant et définies comme prioritaire au niveau national notamment au travers des orientations prises lors du Grenelle de l'environnement. Grâce à cet outil CADUR, les exploitants de carrières peuvent, outre vérifier les différentes prescriptions imposées par la réglementation au travers des arrêtés préfectoraux,

Les résultats obtenus au niveau énergétique sont proches des valeurs obtenues sur les sites de carrière : le modèle implémenté montre, quelque soit le type d'énergie considéré, un écart inférieur à 10 % exception faite du site n°2 en 2004 pour lequel l'écart varie entre 30 et 50 %. Ces forts écarts entre prédictions et données de sites peuvent s'expliquer par les pannes répétées au sein de l'installation et par voie de conséquence par les changements successifs de cadences et de durée de fonctionnement. Ainsi, selon la classe granulaire considérée et tous sites confondus, on peut observer que les besoins énergétiques nécessaires à l'élaboration d'une tonne de granulats varient entre 0,78 et 7,2 kWh.t⁻¹ en électricité et entre 4,19 et 8,75 kWh.t⁻¹ en combustibles fossiles. Ces résultats sont particulièrement de par le fait qu'ils fournissent les premières valeurs françaises de la littérature internationale, en fonction de la classe granulaire produite. On rappelle qu'en 2001, Strippel a évalué les demandes énergétiques imputables à la production de granulats mais en contexte climatique très différents (Suède) de celui que nous connaissons en France. De plus, il s'était uniquement intéressé à une approche globale sans réaliser de distinction entre les différentes classes granulaires. Au niveau des rejets atmosphériques, le travail de thèse a permis d'estimer les quantités émises par les engins présents sur l'exploitation. Au niveau des résultats obtenus, et plus particulièrement vis-à-vis de l'indice global de réchauffement climatique (GWP), on observe que les valeurs obtenues dans le cadre de cette thèse varient de 1,72 à 3,41 kg_{équivalent carbone} par tonne de granulats produites. Ainsi selon le site considéré, un facteur 2 apparaît. Il serait important, dans une prochaine étape, de valider les facteurs d'émissions. Le modèle utilisé est basé sur des connaissances des moteurs reliées aux normes pour les véhicules roulants sans qu'une validation expérimentale n'ait pu être réalisée pour l'instant pour des engins de chantier. Les valeurs unitaires des rejets pris en considération sont, on le rappelle, basés sur la réglementation en vigueur. Enfin, au niveau des nuisances sonores, l'outil développé permet, avec une relativement bonne précision (écarts inférieurs à 5 %), de prédire les niveaux sonores à une distance donnée de l'exploitation. Il permet également d'apprécier les réductions potentielles de ces niveaux pouvant être obtenues par la mise en place de mesures de protection variables de type merlon, étudiées selon leur type et/ou leurs caractéristiques.

Enfin, le paramètre le plus important s'avère n'être ni la nature de la roche exploitée ni la quantité produite mais le site proprement dit et plus précisément la configuration et le mode d'exploitation. La liste des éléments qui ont une incidence sur l'évaluation environnemental réalisée est donc : le nombre et les caractéristiques intrinsèques des engins, l'utilisation ou non de convoyeurs à bande (pour les roches massives cela nécessite la mise en place d'un poste primaire amovible pour rendre la taille des matériaux transportables par convoyeur), les lignes constituant le procédé d'élaboration des classes granulaires au sein de l'usine au travers notamment des différentes possibilités de recirculation des matériaux ou bien encore des différents aménagements réalisés sur l'installation au cours de l'exploitation du site (réalisation de merlon par exemple).

Perspectives d'amélioration du modèle

La discussion précédente indique qu'à ce stade l'outil développé permet de mettre en évidence les points forts et faibles d'un site donné sans permettre pour l'instant d'envisager des comparaisons entre des sites pour dégager des tendances, il semble qu'une approche statistique impliquant un nombre suffisant de sites soit nécessaire. Cette nouvelle démarche permettrait également de pouvoir affiner les modèles implémentés en prenant notamment en compte d'autres paramètres pouvant influencer sur les impacts considérés dans le cadre de la thèse. Quelques éléments sont fournis ci-après.

i) modèles « énergie » et « rejets atmosphériques » :

- un écart important entre les valeurs de consommations énergétiques estimées par l'outil CADUR et celles réellement consommées a pu être constaté sur une analyse. En effet, une sous-consommation électrique de 50 % et, à l'inverse une surconsommation de fioul a été observée sur l'année 2004 du site n°2. L'origine de ces écarts se trouvant soit dans le nombre d'arrêt au niveau de l'installation de traitement soit dans les différentes variations des cadences de production, importance des travaux de terrassement et de découverte, il paraît nécessaire d'intégrer ces deux paramètres dans l'outil CADUR,
- les terres de végétales et les stériles de découverte sont déplacés afin d'exploiter le gisement sous-jacent : cela va générer certains impacts notamment des consommations énergétiques et de rejets atmosphériques par l'utilisation des engins. Toutefois, ces matériaux vont être réutilisés dans le cadre de la remise en état du site, « l'après carrière ». De la même manière, les stériles de production (boues de lavages notamment) peuvent être utilisés dans le réaménagement du site lorsque celui-ci prévoit un remblaiement partiel ou total du site. Par ailleurs, certains sites peuvent être autorisés à remblayer les zones exploitées avec des matériaux extérieurs à partir du moment où ces matériaux sont inertes (déchets de terrassement, déchets de démolition préalablement triés, ...). Outre les volumes de déchets non mis en décharge, ces matériaux permettent souvent de remblayer au terrain naturel et ainsi de redonner son caractère originel au milieu d'un point de vue visuel. Il serait intéressant de pouvoir différencier ces impacts de ceux estimés pour l'instant par l'outil en séparant l'énergie et les rejets imputables à l'élaboration proprement dite de ceux nécessaires aux réaménagements du site. Ainsi, la distinction entre toutes les phases de travaux réalisés au cours de l'exploitation d'une carrière pourrait être réalisée.

ii) modèle « bruit » :

Le modèle « bruit » de l'outil ne prend actuellement en compte que les différents engins présents au sein de l'exploitation considérée. Il est intéressant d'intégrer d'autres sources sonores telles que l'ensemble des équipements électriques (installation de traitement), les chutes et chocs des matériaux, ou bien encore les tirs de mines. Bien que ces derniers présentent un caractère ponctuel, non répétitif et « impulsif », les niveaux acoustiques générés lors de l'utilisation d'explosifs peuvent atteindre des valeurs très importantes.

Enfin, d'autres aspects environnementaux et sociaux pourraient être approchés et intégrés à l'outil également. D'un point de vue quantitatif, il serait intéressant d'implémenter un modèle « eau » en intégrant un indicateur caractérisant le degré de recyclage des eaux au sein de l'exploitation et/ou l'optimisant en estimant les volumes de nouvelles sources d'appoint telle que la récupération des eaux de la plate-forme par exemple. D'un point de vue qualitatif, une démarche menée sur la biodiversité serait particulièrement intéressante. Certes les carrières sont destructrices d'habitats, mais elles peuvent être aussi à l'origine de la création de nouveaux biotopes et de fait, de l'implantation de nouvelles espèces dans une zone géographique précise permettant ainsi d'optimiser la gestion de la faune et de la flore locale. De la même manière, l'utilisation et la gestion d'une exploitation de carrière dans son territoire ouvrent de nombreuses possibilités de valorisation de ce dernier. En effet, outre le côté social de cette activité au travers notamment des emplois créés, les différents réaménagements potentiels permettent de créer/recréer de nouveaux secteurs d'activité post-exploitation : parc de loisir, culture, zone cynégétique en sont quelques exemples.

Références Bibliographiques

- ADEME - <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=11433&m=3&cid=96>, consulté en 2007
- **AFNOR (1993)** - Norme ISO 9613-1, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1 : calculation of the absorption of sound by the atmosphere : 14 p. + Annexes
- **AFNOR (1996)** - NF EN 932-1, Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats - partie 1 : méthodes d'échantillonnage : 11 p. + Annexes
- **AFNOR (1997^a)** - NF EN 933-1, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - analyse granulométrique par tamisage : 9 p. + Annexes
- **AFNOR (1997^b)** - Norme NF EN ISO 14040, Analyse du cycle de vie - Principes et cadre : 12 p.
- **AFNOR (1998)** - Norme NF EN ISO 14041, Analyse du Cycle de Vie - Définition de l'objectif et du champ et analyse de l'inventaire : 30 p. + Annexes
- **AFNOR (1999)** - NF EN 933-9, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - partie 9 : qualification des fines - essai au bleu de méthylène : 12 p. + Annexes
- **AFNOR (2000^a)** - Norme NF EN ISO 14031, Evaluation de la Performance Environnementale - lignes directrices : 21 p. + Annexes
- **AFNOR (2000^b)** - Norme FD ISO/TR 14049, Analyse du Cycle de Vie - Exemples d'application de l'ISO 14041 traitant de la Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire : 45 p.
- **AFNOR (2000^c)** - Norme NF EN ISO 14043, Analyse du Cycle de Vie - Interprétation du cycle de vie : 18 p. + Annexes
- **AFNOR (2000^d)** - Norme NF EN ISO 14042, Analyse du Cycle de Vie - Evaluation de l'impact du cycle de vie : 20 p.+ Annexes
- **AFNOR (2004^a)** - Norme XP P 18-545, Granulats - Éléments de définition, conformité et codification: 55 p. + Annexes
- **AFNOR (2004^b)** – Norme NF P01-010, Qualité environnementale des produits de construction – Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction : 47 p.
- Alert Geomaterials- <http://alert.epfl.ch>, consulté en 2008
- **Archimbaud C., Berthail J., Exbrayat J-C. et Mishellany A. (1990)** - Lavage des granulats et traitement des sables. In Granulats. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées : 371-410 p.

- **Arquié G., Camus A., Charreau M., Dubus J.-L., Dupont P. et Piketty C. (1990^a)** - Le marché des granulats en France. In Granulats. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées : 5-35 p.
- **Arquié G., Guizol C. et Lassartesse J. (1990^b)** - Présentation d'une exploitation. In Granulats. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées : 181-193 p.
- Arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières
- Arrêté du 10 février 1998 relatif à la détermination du montant des garanties financières de remise en état des carrières prévues par la législation des installations classées
- **Balanec J.-L. (2002)** – Approche de l'inventaire de Cycle de Vie en carrière. Mémoire de D.E.S.S. « Géologie de l'Aménagement », Université de Clermont-Ferrand : 49 p. + Annexes
- **Beardsley M. et Linghjem C. (1998)** – Rapport n° NR009A : Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modelling – Compression – Ignition. Unites States Environmental Protection Agency (EPA) : 11 p. + Appendices
- **Benetto E. (2005)** – Analyse du Cycle de Vie – Réalisation de l'inventaire. *Les Techniques de l'Ingénieur* : **Vol. G3** (G5 510) : 19 p.
- **Bérengier M.** (communication orale)
- **Blanc A. (1999)** – Analyse de Cycle de Vie des filières de traitement des sites industriels pollués. Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon : 209 p.
- **Blanc I. et Labouze E. (1999)** – Analyse du Cycle de Vie – Evaluation de la qualité des données. *Les Techniques de l'Ingénieur* : **Vol. G3** (G5 750) : 9 p.
- **Blazy P., Jdid El-Aïd et Yvon J. (1992)** – Fragmentation – Applications. *Les Techniques de l'Ingénieur* : **Vol. JB4** (A5 070) : 21 p.
- **Boilat P. et Marchal M. (1993)** – Foration et tir, Implantation. In Mines et carrières, **Vol.1** : 74-82 p.
- **Boulanger P.-M. (2004)** – Les indicateurs de développement durable : un enjeu scientifique, un enjeu démocratique. Les séminaires de l'Institut du Développement Durable et des Relations Internationales, *Séminaire développement durable et économie de l'environnement*, Belgique : 24 p.
- **Bouni C. (1998)** – L'enjeu des indicateurs du développement durable. Mobiliser des besoins pour concrétiser des principes. *Natures Sciences Sociétés* : **Vol. 6** (3) : 18-26 p.
- **Boutaud A. (2005)** – Le développement durable : penser le changement ou changer le pansement ? Bilan et analyse des outils d'évaluation des politiques publiques locales en matière de développement durable en France : de l'émergence d'un changement dans les modes de faire au défi d'un changement dans les modes de penser. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne : 413 p. + Annexes

- **Butel-Bellini B. et Janin M. (1999)** – Ecoconception : état de l’art des outils disponibles. *Les Techniques de l’Ingénieur* : **Vol. G3** (G6 010) : 12 p.
- **Cabarat R. (1960)** – *Le bruit*. Institut National de Sécurité – 3^{ème} édition : 44 p.
- **CERTU (1997)** – Bruit des infrastructures routières : 51 p. + Annexes
- **CETUR (1980)** – Guide du bruit des transports terrestres. Prévision des niveaux sonores : 287 p. + Annexes
- Circulaire du 11 janvier 1995^a relative au Schéma Départemental de Carrières
- Circulaire du 4 mai 1995^b relative à l’articulation entre les Schémas Directeurs d’Aménagement et de Gestion des Eaux, les Schémas d’Aménagement et de Gestion des Eaux et les Schémas Départementaux de Carrières
- **CITEPA/CORALIE (2006)** – Rapport OMINEA : 790 p. + Annexes
- Décret impérial du 18 novembre 1810 contenant Organisation du Corps impérial des ingénieurs des Mines
- Décret n° 54-321 du 15 mars 1954 portant sur l’exploitation des carrières à ciel ouvert
- Décret n°77-1133 du 21 septembre 1977 pris pour l’application de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l’Environnement
- Décret n° 80-331 du 7 mai 1980 portant sur le Règlement Général des Industries Extractives
- Décret n° 92-647 du 8 juillet 1993 concernant l’aptitude à l’usage des produits de construction
- Décret n° 94-485 du 9 juin 1994^a inscrivant les carrières à la nomenclature des installations classées
- Décret n° 94-486 du 9 juin 1994^b relatif à la Commission Départementale des Carrières
- Décret n°94-603 du 11 juillet 1994^c relatif au Schéma Départemental des Carrières
- Delille J-P. et Moutot J-P. (1990) – Le criblage. In Granulats. Presse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées : 329-370 p.
- Deneux M. (2002) – Rapport sur l’évaluation de l’ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l’horizon de 2025, 2050 et 2100 – Tome 1. Office parlementaire d’évaluation des choix scientifiques et technologiques : 240 p. + Annexes
- Directive 89/106/CEE du Conseil du 21 décembre 1988 relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des Etats membres concernant les produits de construction

- Directive du 16 décembre 1997 sur le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux mesures contre les émissions de gaz et de particules polluants provenant des moteurs à combustion interne destinés aux engins mobiles non routiers
- Directive n° 2000/14/CEE du 8 mai 2000 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux émissions sonores dans l'environnement des matériels destinés à être utilisés à l'extérieur des bâtiments

- Directive du 21 avril 2004, modifiant la directive n°97/68/CE sur le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux mesures contre les émissions de gaz et de particules polluants provenant des moteurs à combustion interne destinés aux engins mobiles non routiers

- Directive n° 2005/88/CEE du 14 décembre 2005 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux émissions sonores dans l'environnement des matériels à être utilisés à l'extérieur des bâtiments

- DIREN -
http://80.118.140.70/HTML_PUBLIC/Site%20de%20consultation/site.php?map=nature-region.map&service_idx=11W, consulté en 2007

- **Dumouza J., Sifre Y. et Van Overbeke V. (2002)** – Tirs à ciel ouvert, tirs de masse et d'abattage, les méthodes conventionnelles pour les règles d'abattage. Paramètres du tir à ciel ouvert. In Les Techniques de L'industrie Minérale, **Vol. 14** : 37-42 p.

- Egal E., Guennoc P., Le Goff E., Thiéblemont D., Houlgatte E., Augris C., Hamon D., Lebreton P. et Hallégouët B. (1996) – Carte Géologique France au 1/50 000, Feuille Pontrieux-Etables-sur-Mer (204)

- **Embleton T.F.W. (1963)** – Sound propagation in homogeneous deciduous and evergreen woods. *Acoustical Society of America* : **Vol.35** (8) : 1119-1125 p.

- **EMEP/CORINAIR (2003)** – Atmospheric Emission Inventory Guidebook. European Environment Agency : 3ème édition

- **EPA (2004)** – Rapport n° NR009c : *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling – Compression – Ignition*. United States Environmental Protection Agency (EPA) : 24 p. + Appendices

- **Espaces pour demain (2002)** – L'industrie des carrières et le développement durable : un guide pour comprendre et agir : 100 p. + Annexes

- **Galin R. et Sionneau J-M. (1990)** - Les carrières et l'environnement. In Granulats. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées : 37-70 p.

- **Harris C-M. (1971)** – Effects of humidity on the velocity of sound in air. *Acoustical Society of America* : **Vol. 49** (3) : 890-893 p.

- **Hoang T. (2005)** – Tronçons autoroutiers : une méthodologie de modélisation environnementale et économique pour différents scénarios de construction et d’entretien. Thèse l’Ecole Centrale de Nantes : 326 p.
- **Houot R. et Joussement R. (1995)** – Criblage. *Les Techniques de l’Ingénieur* : **Vol. JB3** (J3 100) : 24 p.
- IFEN - <http://www.ifen.fr/indicateurs/presentation.html>, consulté en 2005
- **IFEN (2002)** – La construction. In L’environnement en France. IFEN : 433-450 p.
- Institut de l’énergie et de l’environnement de la francophonie (2001) – *Glossaire pour le développement durable* : 88 p.
- Instruction ministérielle du 31 janvier 1955 pour l’application du décret n° 54-321 du 15 mars 1954 portant sur l’exploitation des carrières à ciel ouvert
- **IPCC (2001)** – Climate change 2001 : The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary. Cambridge University Press : 83 p.
- **Khalifa K. (1999)** – Analyse du Cycle de Vie – Problématique de l’évaluation des impacts. *Les Techniques de l’Ingénieur* : **Vol. G3** (G5 610) : 10 p.
- **Khalifa K. (2002)** – Analyse du Cycle de Vie – Méthodes d’évaluation des impacts. *Les Techniques de l’Ingénieur* : **Vol. G3** (G5 615) : 20 p.
- **Kusko B-H. et Franklin W-E. (1998)** – Analyse du Cycle de Vie – Réalisations de l’inventaire. *Les Techniques de l’Ingénieur* : **Vol. ARCH9** (G5 500 – 01 – 1998) : 11 p.
- **Lavandier C. (2007)** – Perception de l’environnement sonore. HDR de l’Université de Cergy Pontoise ; voir sur : <http://www.u-cergy.fr/article10359.html>
- **Le Borgne F. (2001)** – Réponses hydrogéochimiques de la nappe phréatique du Val d’Orléans aux sollicitations de son environnement. Développement du site expérimental de la carrière Morillon-Corvol de Sandillon (45). Thèse de l’Université de Paris 7 : 749 p.
- **Lescuyer L. (2004)** – EIME, un outil d’aide à la conception des produits. *Les Techniques de l’Ingénieur* : **Vol. G3** (G6 100) : 7 p.
- Loi du 21 avril 1810 concernant les Mines, les Minières et les Carrières
- Loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l’Environnement
- Loi n° 93-3 du 4 janvier 1993 relative aux carrières
- **Lot J. et De Larupelle G. (1990)** – Découverte, extraction, chargement, transport dans les exploitations de roches massives. In Granulats. Presse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées : 195-246 p.

- **Madec P. (2003)** – *Les indicateurs de développement durable : présentation des expériences en cours et applications au secteur de l'aquaculture*. Mémoire de D.E.S.S. « Activités et Aménagements Littoraux et Maritimes ». Université de Montpellier II : 118 p.
- **Maekawa Z. (1968)** – Noise reduction by screens. *Applied acoustics* : **Vol. 1** (3) : 157-173 p.
- **Martaud T., Jullien A., Deneele D., Proust C. et Lédée V. (2007)** – Ressource en granulats : une démarche pour la prise en compte d'indicateurs de développement durable. *AFGC 2007, Paris*, 21-22 mars : 9 p.
- **Martaud T., Jullien A., Deneele D. et Proust C. (2008)** – Towards sustainable management of quarries. *TRA 2008, Ljubljana, Slovénie*, 21-24 avril : 6 p.
- **Mériel B. et Bonhomme B. (2001)** – Le bruit des chantiers. In Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. **Vol. Thématique Acoustique** : 181-192 p.
- **Mitra A-P., Morawska L., Sharma C. Et Zhang J. (2002)** – Chapter 2 : methodologies for characterisation of combustion sources and for quantification of their emissions. *Chemosphere* : **Vol. 49** : 903-922 p.
- **Mouret J. et Vallet M. (1998)** – *Les effets du bruit sur la santé*. Centre d'information et de documentation sur le bruit : 113 p. + Références
- **OCDE (1993)** – OECD core set of indicators for environmental performance reviews, a synthesis report by the group on the state of the environment – Framework n° 1 : 35 p.
- OFRIR - <http://ofrir.lcpc.fr>, consulté en 2005
- **Personne M. (1998)** – Contribution à la méthodologie d'intégration de l'environnement dans les PME-PMI : Evaluation des performances environnementales. Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon : 216 p. + Annexes
- **Personne M. et Brodhag C. (1998)** – Evaluation des performances environnementales des PME. *Les Techniques de l'Ingénieur* : **Vol. G3** (G5 100) : 16 p.
- **Pierce A-D. (1981)** – Scattering and diffraction. In *Acoustics : an introduction to its physical. Principles and applications* : 424-507 p.
- **Prax A. (1990)** – Découverte, extraction, chargement, transport dans les exploitations de roches meubles. In *Granulats*. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées : 247-283 p.
- **Premat E. (2000)** – Prise en compte d'effets météorologiques dans une méthode d'éléments finis de frontière. Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon – Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat : 258 p. + Annexes
- **Risse N. et Waaub J-P. (1999)** – *Etude de faisabilité sur l'établissement d'indicateurs de développement durable pour le Québec*. Direction de l'éducation et de la promotion du développement durable, Ministère de l'Environnement du Québec : 89 p. + Annexes

- **Rousseaux P. (1998)** – Analyse du Cycle de Vie – Evaluation des impacts. *Les Techniques de l'Ingénieur* : **Vol. G3** (G5 605) : 11 p.
- **Rousseaux P. (2005)** – Analyse du Cycle de Vie (ACV). *Les Techniques de l'Ingénieur* : **Vol. G3** (G5 500) : 4 p.
- **Sayagh S. (2007)** – Approche multicritère du recyclage de matériaux alternatifs dans la chaussée. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées : 219 p.
- **Schneider F., Chevalier J. et Navarro A. (1998)** – Analyse du Cycle de Vie – Problèmes d'affectation. *Les Techniques de l'ingénieur* : **Vol. G3** (G5 550) : 16 p.
- **SETAC (1993)** – Guidelines for Life Cycle Assessment : a “code of practice” 1st edition, Ed. SETAC from the SETAC workshop, Sesimbra, Portugal, 31 mars – 3 avril,
- **Sifre Y. et Dumouza J. (2002)** – Tirs à ciel ouvert, tirs de masse et d'abattage, conditions générales. In *Les Techniques de l'Industrie Minérale* : **Vol. 14** : 33-36 p.
- **Strippel H. (2001)** – Report n° B 1210E : *Life Cycle Assessment of Road – A pilot study for inventory analysis*. IVL Swedish Environmental Research Institute : 96 p. + Annexes
- **Tyteca D. (2002)** – Problématique des indicateurs environnementaux et de développement durable. Congrès de la Société de l'Industrie Minérale : Atelier 5 : « *Le développement durable et ses indicateurs* », Palais des congrès, Liège : 15 p.
- **UEPG (2005)** – Rapport annuel 2005 de l'Union Européenne des Producteurs de Granulats. Des matériaux pour construire l'avenir : 16 p.
- **UNICEM** - <http://www.charte.unicem.fr>, consulté en 2006
- **UNICEM Bretagne** - <http://www.unicem-bretagne.fr>, consulté en 2007
- **UNPG (2004)** – Le marché des granulats en 2004 : 2 p.
- **UNPG (2006)** – Les Granulats – Géologie, Industrie, Environnement : 31 p.
- **Ventère J-P. (1997)** – Conception écologique des produits. *Les Techniques de l'Ingénieur* : **Vol. G3** (G6 000) : 8 p.
- Wikipedia - <http://fr.wikipedia.org/wiki/Triphas%C3%A9>, consulté en 2007
- **Wong G.S.K. et Embleton T.F.W. (1985)** – Variation of the speed of sound in air with humidity and temperature. *Acoustical Society of America* : **Vol. 77** (5) : 1710–1712 p.
- **Yernaux M. et Maldonado A. (1990)** – Manutention, stockage, reconstitution, pesage, expédition, transport des granulats. In *Granulats*. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées : 443-516 p.
- **Zaccaï E. et Bauler T. (à paraître)** – *Indicateurs pour un développement durable* : 8 p.

- **Zouboff V. et Terme G. (1999)** – Bruits aux abords des carrières – Approche pratique du bruit aux abords des carrières. Compte rendu de synthèse – Sujet n°1-74-01-8 « Bruit des installations et des transports ». *Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers* : 62 p. + Annexes

ANNEXES

-Annexe 1- Questionnaire « Siège »

Enquête siège sur le développement durable appliqué aux exploitations de carrières

Contact :

Thomas.Martaud@lcpc.fr

Tél : 02.40.84.56.30

LCPC Nantes, Section Granulat (point 71) BP 4119 - 44341 Bouguenais cedex.

Sources :

Personne réalisant la collecte :

Nom :

ORGANISME/ENTREPRISE : _____

Date :

Adresse :

Caractéristiques générales de l'exploitation

1. Raison sociale et coordonnées

Nom et adresse du siège sociale :

.....
.....

2. Chiffre d'affaire annuel de l'exploitation

Année : C.A : €

Année : C.A : €

3. Coordonnées Lambert de l'exploitation

X : Y :

4. Type d'exploitation

☐ Roches massives ☐ Calcaires ☐ Roches alluvionnaires ☐ Sables

5. Date et durée d'autorisation de l'exploitation

Initiale :

Actuelle :

Envisagée :

6. Superficie de l'exploitation (ha)

- Totale autorisée :
- Exploitée :
- Inexploitée :
- Réaménagée :

7. Situation géographique de l'exploitation

☐ Zone péri-urbaine ☐ Zone urbaine ☐ Zone rurale

Distance approximative de la zone résidentielle la plus proche :

Distance approximative de l'exploitation la plus proche :

8. Votre site se situe-t-il dans une zone d'implantation, d'intérêt environnemental, (parc régional, Natura 2000...)

☐ oui ☐ non

Si oui, précisez :

Caractéristiques des matériaux produits et vendus

9. Production

Autorisée :

10. Caractéristiques géotechniques

Nature de la roche exploitée :

Los Angeles :..... Micro-Deval :

PSV ou CPA : Fraction Sableuse (cas des sablières) :

Masse volumique :

Aspects environnementaux

11. Quelle est la provenance de l'eau utilisée

☐ Prélèvement dans nappe souterraine

☐ Collecte des eaux de surface au sein de la carrière

☐ Autres, précisez :

12. Quel est votre système de traitement des eaux de procédés

☐ Décantation naturelle

☐ Décantation avec flocculateur

☐ Circuit avec décanteur /clarificateur

☐ Circuit avec filtre-presse

☐ Autres, précisez :

13. Données d'empoussièrement

- Organisme ayant procédé aux mesures :
- Fréquence des mesures :

	Distance vis-à-vis de :				Méthode de mesure	Valeur moyenne observée
	la zone d'extraction	l'usine d'élaboration	l'entrée de votre exploitation	populations avoisinantes les plus proches		
Point i						

14. Données d'émissions sonores

- Organisme ayant procédé aux mesures :
- Fréquence des mesures :

	Distance vis-à-vis de :				Méthode de mesure	Valeur moyenne observée
	la zone d'extraction	l'usine d'élaboration	l'entrée de votre exploitation	populations avoisinantes les plus proches		
Point i						

Aspect économique (annuellement sauf pour investissement)

15. Coût d'investissement foncier de votre exploitation €
16. Coût d'investissement de l'usine de traitement €
17. Coût d'investissement des engins €
18. Charges salariales de votre exploitation €
19. Taxes diverses (TGAP, redevance eau, foncier, ...) €

-Annexe 2- Questionnaire « Site »

Enquête site sur le développement durable appliqué aux exploitations de carrières

Contact :

Thomas.Martaud@lcpc.fr

Tél : 02.40.84.56.30

LCPC Nantes, Section Granulat (point 71) BP 4119 - 44341 Bouguenais cedex.

Sources :

Personne ayant effectué la visite :

NOM : _____
ORGANISME/ENTREPRISE : _____
DATE : _____
ADRESSE : _____

Caractéristiques générales de l'exploitation

1. Êtes-vous certifié ou appartenez-vous à :

☐ Marquage CE2+ ☐ NF ☐ ISO 9001

☐ ISO 14001 ☐ Charte environnement (si oui, précisez le niveau actuel) :

Caractéristiques des matériaux produits et vendus

2. Production

Réelle :

3. Répartition granulométrique des matériaux

Fraction granulométrique	... (%)	... (%)	... (%)	... (%)	... (%)	... (%)	... (%)	... (%)	Autres (à préciser) :
Production									

4. Quantité de granulats lavés (% de production et quantité en tonnage)

% de production : Tonnage :

	... (%)	... (%)	... (%)	... (%)	... (%)	... (%)	... (%)	... (%)	Autres (à préciser) :
Production lavée									

5. Utilisation dominante des matériaux produits

☐ Infrastructure routière ☐ Génie civil

☐ Autres (préciser) :

6. Distance moyenne de transport des matériaux

☐ <20 km

☐ <50 km

☐ <100 km

☐ >100 km

Distance moyenne (km) :

7. Moyens de transport (%)

Routier :

Ferroviaire :

Par voie navigable :

Fonctionnement de l'exploitation

8. Distance moyenne (m)

Extraction / installation de traitement (primaire) :

Installation de traitement / zone de stockage :

9. Moyen de transport principal des matériaux in situ :

☐ Véhicule ☐ Bande transporteuse capotée ☐ Bande transporteuse non capotée

10. Consommation énergétique globale

Consommation électrique annuelle : kWh

Consommation en FOD annuelle : litres

11. Véhicules présents sur l'exploitation

Non routiers :

Engin	Fonction	Marque	Réf	Année	Puissance (kWh)	Consommation à vide (l.h ⁻¹)	Consommation en charge (l.h ⁻¹)	Année et prix d'achat

Routiers :

Engin	Fonction	Marque	Réf	Année	Puissance (kWh)	Consommation à vide (l.h ⁻¹)	Consommation en charge (l.h ⁻¹)	Année et prix d'achat

12. énergie électrique

	Totale	Usine d'élaboration	Système de lavage	Autres, précisez :	Autres, précisez :
Puissance installée (kW)					
Energie consommée (kWh)					

Merci de précisez les renseignements suivants :

Poste primaire					
	Débit (t.h ⁻¹)	Puissance	cos φ	Intensité nominale	Intensité mesurée
Scalpeur					
Concasseur					
Crible					
moteurs des BT					
Bandes transporteuses (mètre linéaire) :					
Poste secondaire					
	Débit (t.h ⁻¹)	Puissance	cos φ	Intensité nominale	Intensité mesurée
Concasseur					
Crible					
moteurs des BT					
Bandes transporteuses (mètre linéaire) :					
Poste tertiaire					
	Débit (t.h ⁻¹)	Puissance	cos φ	Intensité nominale	Intensité mesurée
Concasseur					
Crible					
moteurs des BT					
Bandes transporteuses (mètre linéaire) :					
Station de lavage					
	Débit (t.h ⁻¹)	Puissance	cos φ	Intensité nominale	Intensité mesurée
Crible					
moteurs des BT					
Bandes transporteuses (mètre linéaire) :					

Existe t-il un circuit de recirculation des matériaux au sein de l'usine de traitement ?

☐ oui

☐ non

Si oui, veuillez préciser à combien estimez-vous la proportion de matériaux y circulant :
% et veuillez remplir le tableau suivant :

recyclage des matériaux					
	Débit (t.h ⁻¹)	Puissance	cos φ	Intensité nominale	Intensité mesurée
Concasseur					
Crible					
moteurs des BT					
Bandes transporteuses (mètre linéaire) :					

13. Utilisation d'explosif

☐ oui

☐ non

Si votre réponse est non, vous pouvez passer à la question suivante

Quelle est la fréquence moyenne des tirs :

Fiche de tir classiquement employée sur votre exploitation :

type de tir	Nb de rangée	Nb Trou par rangée	Profondeur	Sur-profondeur	diamètre	banquette	espacement	charge spécifique
1								
2								

Quantité d'explosifs utilisés :

	dynamite	Nitrate Fioul	émulsion en vrac	émulsion encartouchée	Autres : précisez
Moyenne par tir					
Annuellement					

Fournisseur d'explosif :

Sous-traitance concernant la foration :

☐ oui

☐ non

Si oui :

Nom et coordonnées de l'entreprise sous-traitante :

.....

.....

Engin utilisé :

Marque	Réf	Année	Puissance (kWh)	Consommation	Vitesse foration	de

Coût de foration au mètre linéaire :..... €

Aspects environnementaux

14. Volume d'eau consommé chaque année :

Année : Volume (m³) :

Année : Volume (m³) :

15. Quantité de fines de lavage produites et devenir

Année : Volume (m³) : Devenir :

Année : Volume (m³) : Devenir :

16. Volume d'eau rejeté

Année : Volume (m³) :

Année : Volume (m³) :

17. Production de déchets

Quantité totale de déchets produits :

Année : Quantité (kg) :

Année : Quantité (kg) :

Un tri sélectif est-il effectué sur votre exploitation :

☐ oui ☐ non

Si oui, veuillez précisez les quantités suivantes

DIB¹ : Année : Quantité (kg) : Type :

Année : Quantité (kg) : Type :

¹ Déchet Industriel Banal

DIS² : Année : Quantité (kg) : Type :

 Année : Quantité (kg) : Type :

18. Filière de recyclage de ces déchets

DIB :
 DIS :

Aspect économique (annuellement sauf pour investissement)

19. Coût du recyclage des déchets

DIB : €
 DIS : €

² Déchet Industriel Spécial

20. Coût d'entretien ou de renouvellement des engins €

21. Coût d'entretien ou de renouvellement des matériels

Concasseur : €

Crible : €

Bande transporteuse : €

Système de lavage : €

22. Coût de revient moyen d'une tonne de granulats

..... € par tonne de granulat

Aspect social

23. Nombre actuel de salariés

Employés totaux :

Ouvriers :

Techniciens :

Agents de maîtrise :

Cadres :

24. Nombre d'emplois indirects associés à votre activité, selon vous :

25. Nombre d'heures travaillées

Année : Heures :

Année : Heures :

26. Combien d'accidents du travail avez-vous déclarés ?

Année : Heures :

Année : Heures :

27. Nombre d'heures de travail perdues en raison d'accidents de travail

Année : Heures :

Année : Heures :

28. Nombre de plaintes associées à votre activité ont été déposées par les riverains

Année : Nombre de plaintes :

Année : Nombre de plaintes :

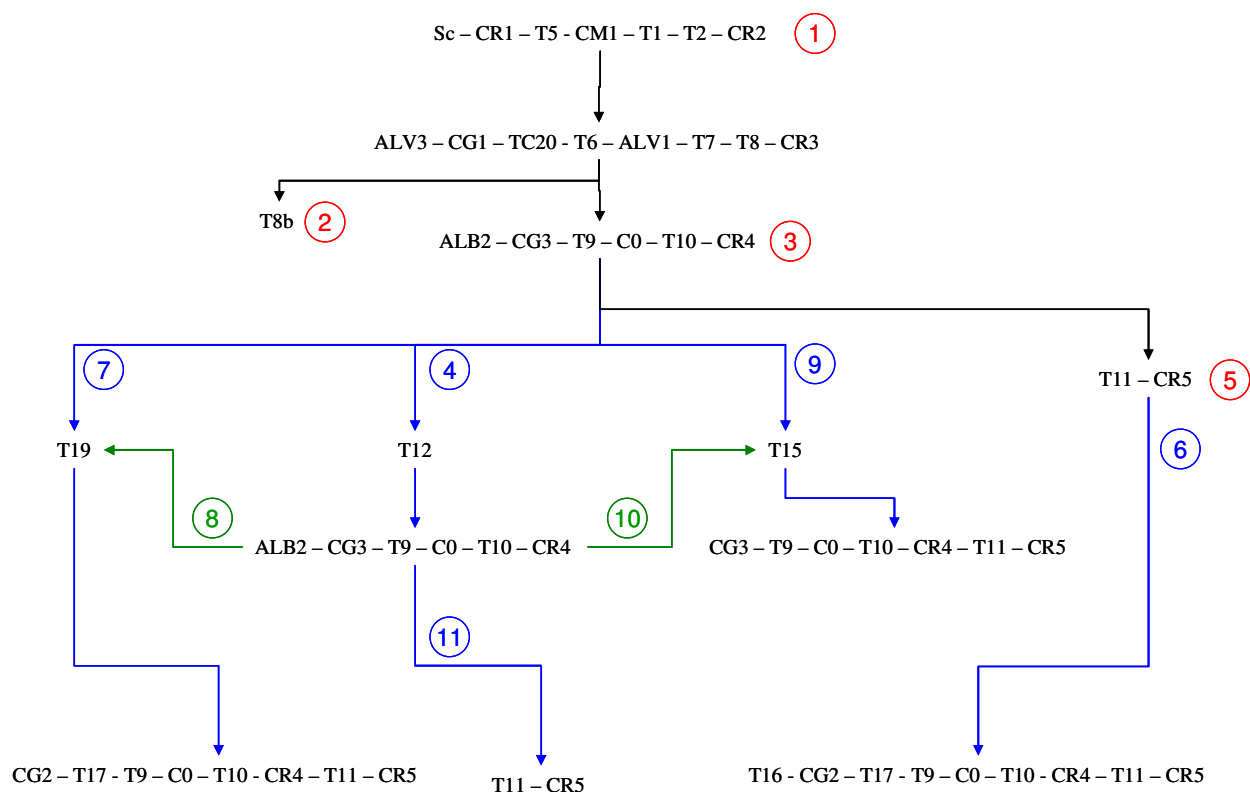
29. Motifs principaux de ces plaintes

- Annexe 3 - modélisation des lignes de production

Cette annexe détaille les lignes de production potentielles des classes granulaires. Pour chaque fraction, on a créé des lignes différentes car la sortie est différente. La nomenclature utilisée reprend la codification présentée et utilisée au chapitre II dans les synoptiques des installations de traitement de chacune des exploitations. L'ensemble des lignes de production peuvent être classées en deux catégories : les lignes dites à sortie directe et les lignes dites à sortie indirecte.

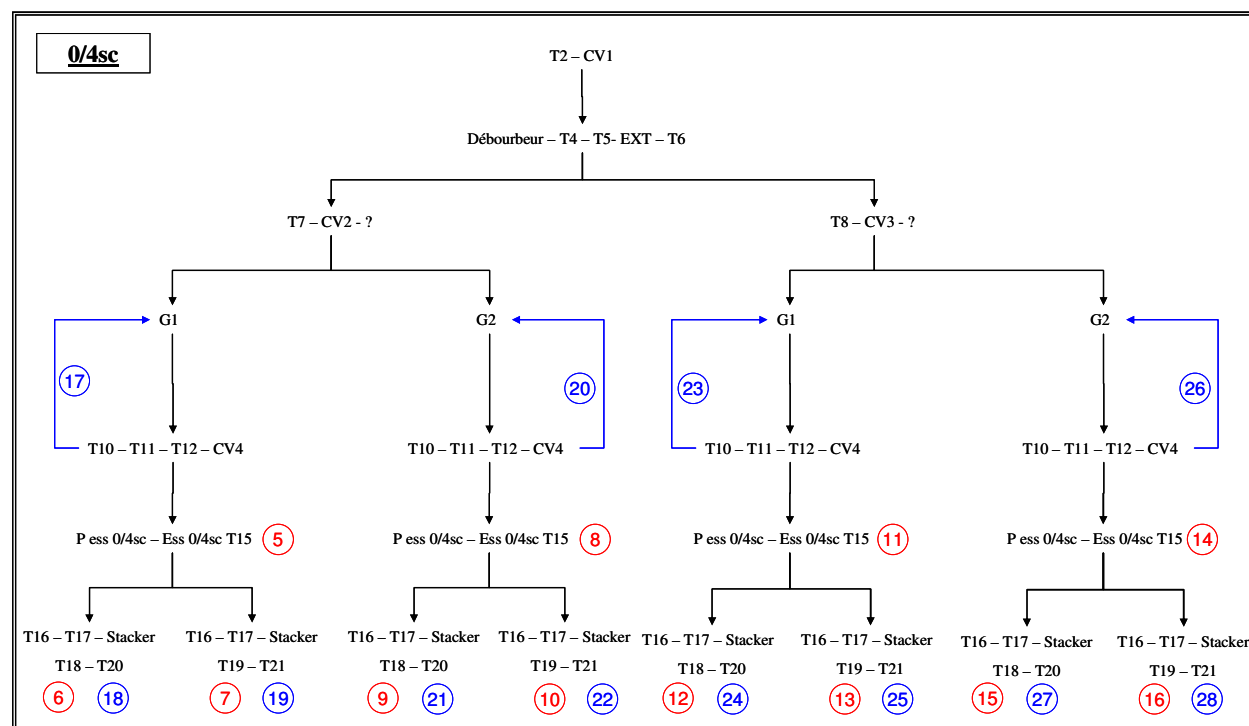
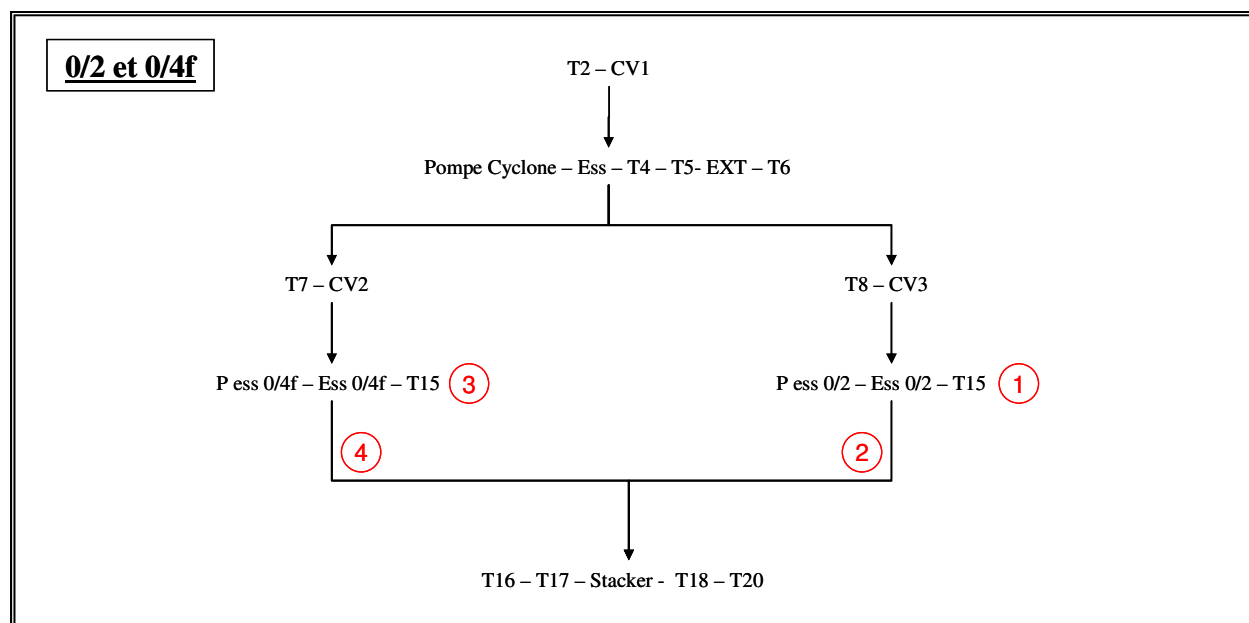
Site n° 1

La figure suivante synthétise l'ensemble des 11 lignes de production potentielles et montre ainsi la complexité du trajet suivi par les granulats au cours de leur élaboration dans l'installation de traitement. Les lignes de production à sortie « directe » sont numérotées en rouge, les lignes à sortie « indirecte » sont de couleur bleue lors d'une seule recirculation des matériaux et en vert lors d'une double recirculation.

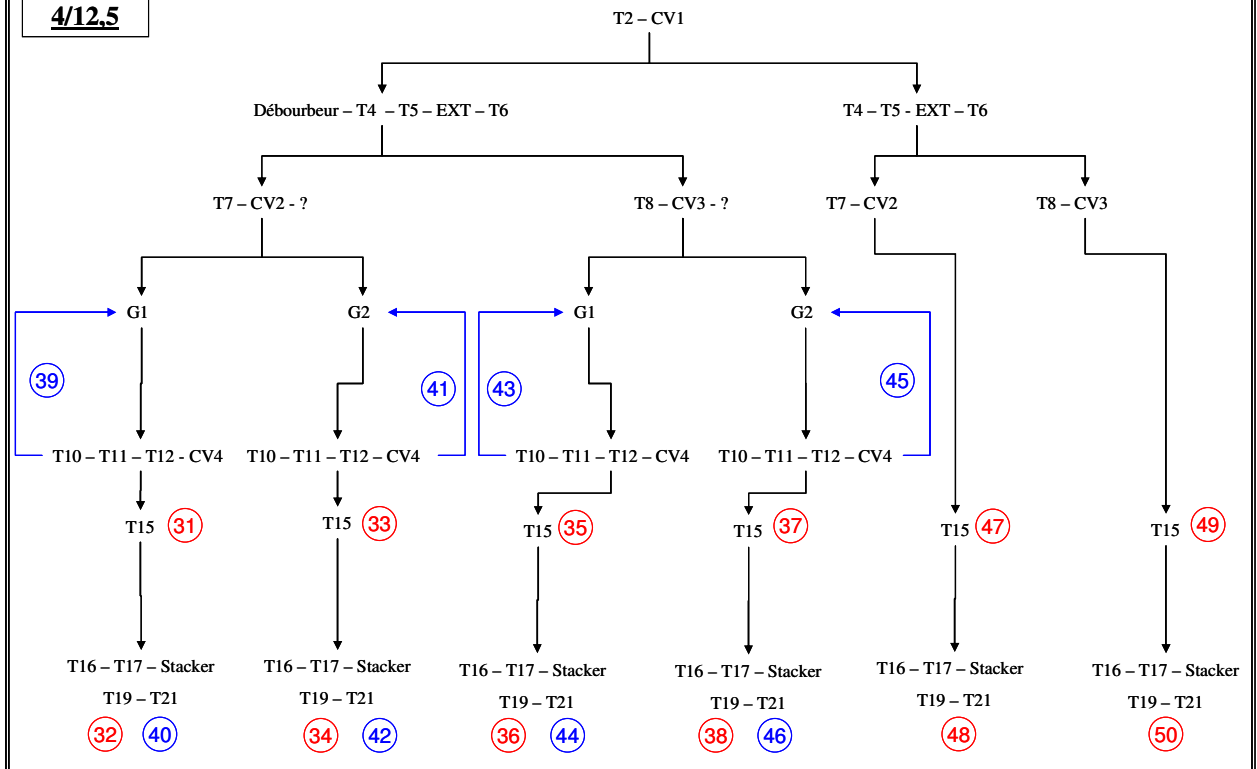


Site n° 2

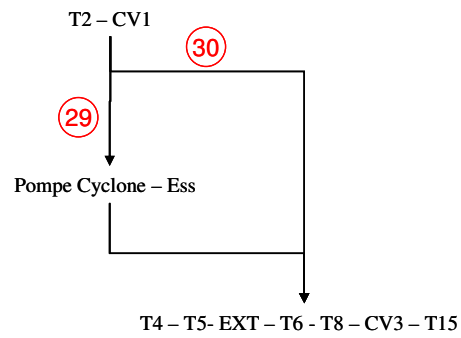
La figure montre l'ensemble des 58 lignes de production potentielles du site n°2 Les lignes de production à sortie « directe » sont numérotées en rouge, les lignes à sortie « indirecte » sont de couleur bleue lors de l'existence d'une seule recirculation des matériaux.



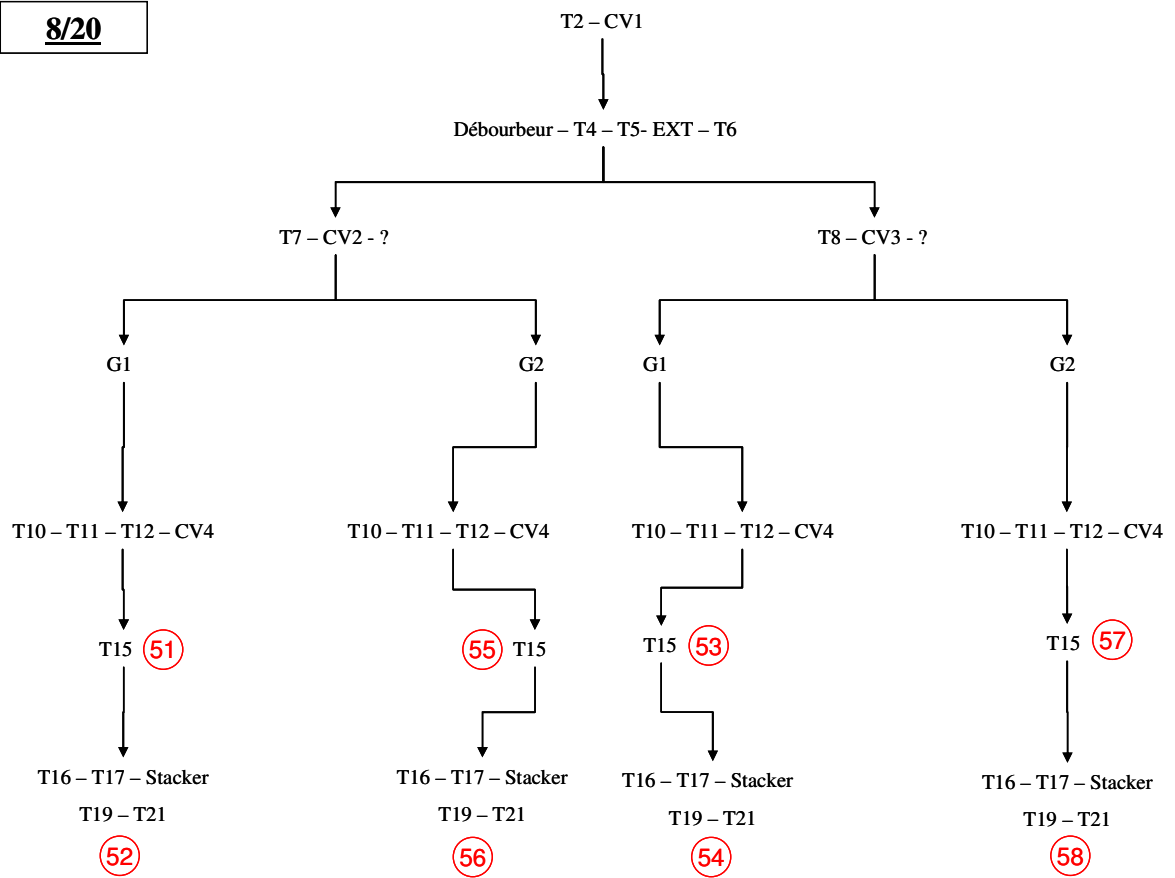
4/12.5



2/6

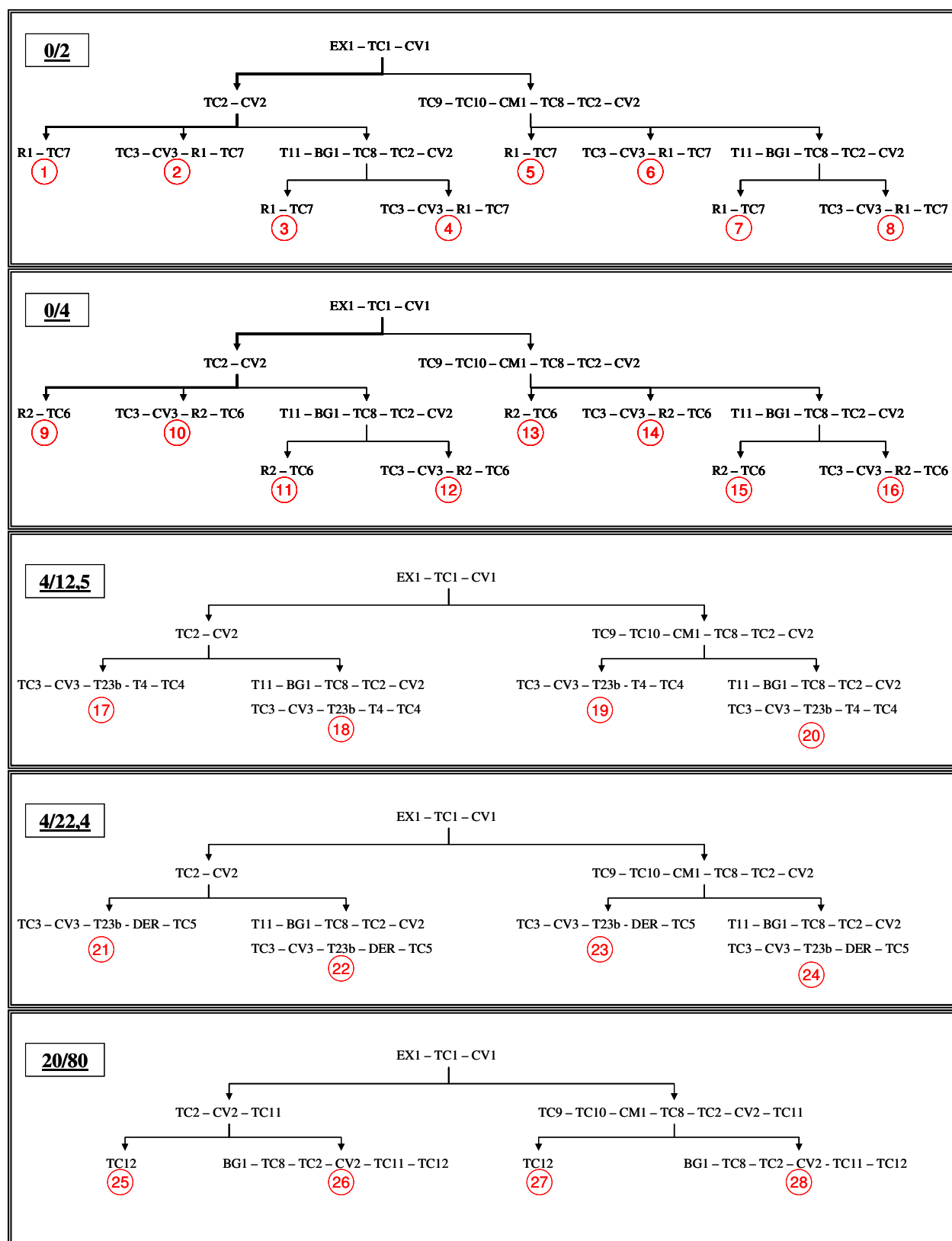


8/20



Site n° 3

Les lignes dites à sortie directe sont les lignes de production n° 1, 9, 17, 21 et 25.



-Annexe 4 - Configurations d'affectation testées pour les différents sites

Site n° 2

Classe granulométrique	Ligne de production	Configuration n°1	Configuration n°2	Configuration n°3	Configuration n°4	Configuration n°5
0/2 (5 %)	Ligne 1	0	0	0	0	0
	Ligne 2	100	100	100	100	100
0/4 f (31 %)	Ligne 3	0	0	0	0	0
	Ligne 4	100	100	100	100	100
0/4 sc (33 %)	Ligne 5	0	0	0	0	0
	Ligne 6	50	0	25	0	6,25
	Ligne 7	50	0	25	0	6,25
	Ligne 8	0	0	0	0	0
	Ligne 9	0	0	0	25	6,25
	Ligne 10	0	0	0	25	6,25
	Ligne 11	0	0	0	0	0
	Ligne 12	0	50	25	0	6,25
	Ligne 13	0	50	25	0	6,25
	Ligne 14	0	0	0	0	0
	Ligne 15	0	0	0	25	6,25
	Ligne 16	0	0	0	25	6,25
	Ligne 17	0	0	0	0	0
	Ligne 18	0	0	0	0	6,25
	Ligne 19	0	0	0	0	6,25
	Ligne 20	0	0	0	0	0
	Ligne 21	0	0	0	0	6,25
	Ligne 22	0	0	0	0	6,25
	Ligne 23	0	0	0	0	0
	Ligne 24	0	0	0	0	6,25
	Ligne 25	0	0	0	0	6,25
	Ligne 26	0	0	0	0	0
	Ligne 27	0	0	0	0	6,25
	Ligne 28	0	0	0	0	6,25
2/6 (6 %)	Ligne 29	100	80	60	40	50
	Ligne 30	0	20	40	60	50
4/12,5 (11 %)	Ligne 31	0	0	0	0	0
	Ligne 32	50	0	25	0	10
	Ligne 33	0	0	0	0	0
	Ligne 34	0	0	0	25	10
	Ligne 35	0	0	0	0	0
	Ligne 36	0	50	25	0	10
	Ligne 37	0	0	0	0	0
	Ligne 38	0	0	0	25	10
	Ligne 39	0	0	0	0	0
	Ligne 40	0	0	0	0	10
	Ligne 41	0	0	0	0	0
	Ligne 42	0	0	0	0	10
	Ligne 43	0	0	0	0	0
	Ligne 44	0	0	0	0	10
	Ligne 45	0	0	0	0	0
	Ligne 46	0	0	0	0	10
	Ligne 47	0	0	0	0	0
	Ligne 48	50	25	25	25	10
	Ligne 49	0	0	0	0	0
	Ligne 50	0	25	25	25	10
8/20 (14 %)	Ligne 51	0	0	0	0	0
	Ligne 52	100	0	50	0	25
	Ligne 53	0	0	0	0	0
	Ligne 54	0	100	50	0	25
	Ligne 55	0	0	0	0	0
	Ligne 56	0	0	0	50	25
	Ligne 57	0	0	0	0	0
	Ligne 58	0	0	0	50	25

Site n° 3

Le choix des coefficients est fait arbitrairement en s'appuyant sur les éléments suivants (explication donnée pour la fraction 0/2) :

la configuration n°1 considère que 100 % de la masse est produite directement sans aucune recirculation de matériaux au sien de l'usine d'élaboration. Il s'agit d'un cas extrême qui ne semble guère réaliste,

la configuration n°5 définit les sept lignes, autre que la ligne directe (ligne n°1), comme équivalente avec une production directe très faible (soit 16 % pour la ligne n°1). Il s'agit d'un autre cas extrême, guère plus réaliste,

ensuite, les trois configurations intermédiaires ont été définies entre ces deux cas extrêmes en changeant la répartition de manière empirique, entre la ligne n°1 dont on diminue progressivement la masse qui lui est affectée et les autres lignes qu'on envisage de ne pas du tout utiliser ou avec le même coefficient d'affectation.

Une fois ce jeu d'hypothèses de calcul fixé pour la fraction 0/2, on reproduit la démarche pour la fraction 0/4 pour laquelle huit lignes de production potentielles sont également définies. Pour les classes granulaires 4/12,5 ; 4/22,4 et 20/80, on procède de manière analogue avec des coefficients plus élevés du fait d'un nombre de lignes plus faibles (quatre lignes potentielles). Enfin, on privilégie les lignes à une recirculation (Ligne n°23) aux lignes à plusieurs recirculations de matériaux (Ligne n°24).

Classe granulométrique	Ligne de production	Configuration n°1	Configuration n°2	Configuration n°3	Configuration n°4	Configuration n°5
0/2 (2%)	Ligne 1	100	80	60	50	16
	Ligne 2	0	20	20	20	12
	Ligne 3	0	0	0	5	12
	Ligne 4	0	0	0	5	12
	Ligne 5	0	0	10	5	12
	Ligne 6	0	0	10	5	12
	Ligne 7	0	0	0	5	12
	Ligne 8	0	0	0	5	12
0/4 (73%)	Ligne 9	100	80	60	50	16
	Ligne 10	0	20	20	20	12
	Ligne 11	0	0	0	5	12
	Ligne 12	0	0	0	5	12
	Ligne 13	0	0	10	5	12
	Ligne 14	0	0	10	5	12
	Ligne 15	0	0	0	5	12
	Ligne 16	0	0	0	5	12
4/12,5 (9%)	Ligne 17	100	80	80	50	25
	Ligne 18	0	20	0	20	25
	Ligne 19	0	0	20	20	25
	Ligne 20	0	0	0	10	25
4/22,4 (16%)	Ligne 21	100	80	80	50	25
	Ligne 22	0	20	0	20	25
	Ligne 23	0	0	20	20	25
	Ligne 24	0	0	0	10	25
20/80 (0%)	Ligne 25	100	80	80	50	25
	Ligne 26	0	20	0	20	25
	Ligne 27	0	0	20	20	25
	Ligne 28	0	0	0	10	25

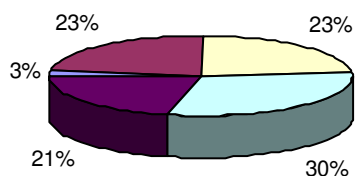
- Annexe 5 - Valeurs d'intensité des moteurs électriques présents sur le site n°2

lieu	Type	Référence	P _{nominale} (kW)	I _{consommée} estimée (A)
<u>débouillage</u>	convoyeur	T2	25	20
	crible	CV1	30	25
	déboureur	déboureur	30	25
	pompe	pompe cyclone	45	62
	essoreur	essoreur	3,5	5
	convoyeur	T4	18,5	20
	convoyeur	T5	18	20
<u>usine de traitement</u>	extracteur	extracteur	3,5	6
	convoyeur	T6	18,5	20
	convoyeur	T7	5,5	6
	convoyeur	T8	5,5	6
	crible	CV2	22	20
	crible	CV3	22	20
	convoyeur	T10	7,5	12
	convoyeur	T11	18	20
	convoyeur	T12	22,5	20
	crible	CV4	22	20
	convoyeur	T13	4	5
	convoyeur	T14	7,5	12
	essoreur	ess 0/4sc	8,5	16
	essoreur	ess 0/2	4	5
	essoreur	ess 0/4f	7,5	12
	pompe	pompe ess 0/4sc	90	120
	pompe	pompe ess 0/2	15	20
	pompe	pompe esso 0/4f	55	62
	concasseur	G1	110	180
	concasseur	G2	90	120
<u>destockage</u>	convoyeur	T15	20,5	20
	convoyeur	T16	14	20
	convoyeur	T17	18	20
	convoyeur	T18	22	20
	convoyeur	T19	22	20
	convoyeur	T20	18	20
	convoyeur	T21	18	20
	stracker	Stacker	2,2	5
<u>recomposition</u>	convoyeur	T2	7,5	12
	convoyeur	T3	7,5	12
	convoyeur	T4	7,5	12
	crible	CV	11	10
	convoyeur	T0	7,5	12
	convoyeur	T1	7,5	12
	convoyeur	Ta		2
	convoyeur	Tb		2
	convoyeur	Tc		2
<u>Forage</u>	pompe	eau claire	55	62
	pompe	eau claire nappe 1	132	200
	pompe	eau claire nappe 2	132	200
	pompe	reprise	55	62
	pompe	reprise	37	50

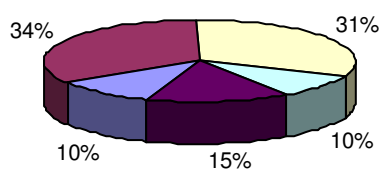
- Annexe 6 - Autres types de rejets atmosphériques

Site n° 1

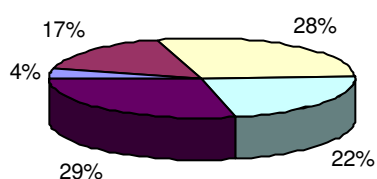
Émissions de gaz toxiques (NO_x, SO₂ et CO)



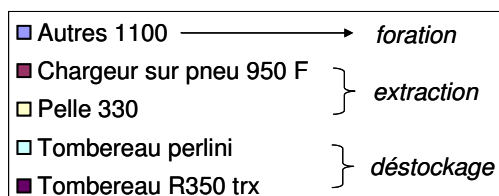
Émissions de NO_x



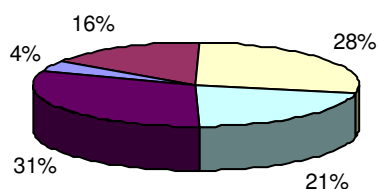
Émissions de SO₂



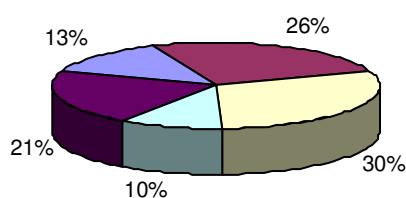
Émissions de CO



Émissions de familles chimiques organiques (COVNM et POP)

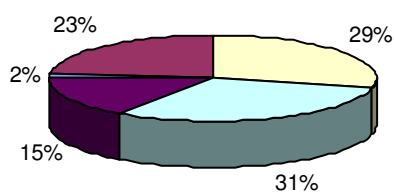


Émissions de COVNM

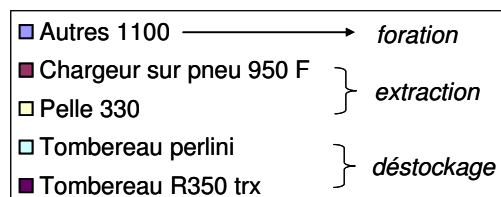


Émissions de POP

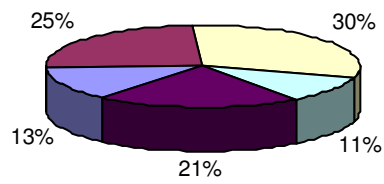
Émissions de particules solides (PM_{2,5} et PM₁₀)



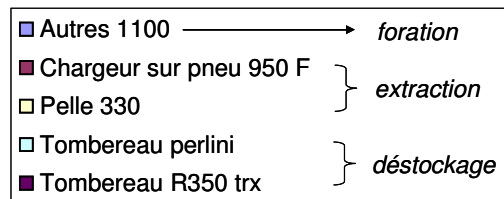
Émissions de PM (2,5 et 10)



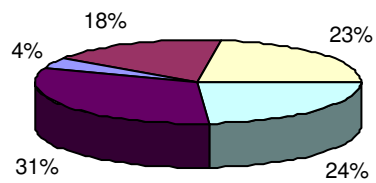
Émissions de métaux lourds (Cd, Cu, Cr, Ni, Se et Zn)



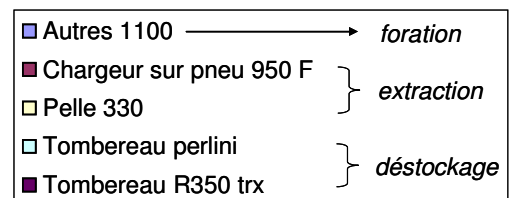
Emissions de métaux lourds



Émissions d'ammoniac (NH₃)

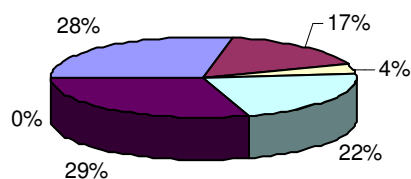


Emissions de NH₃

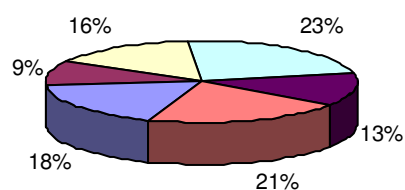


Site n° 2

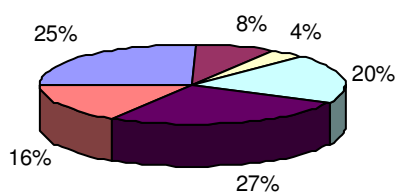
Émissions de gaz toxiques (NO_x, SO₂ et CO)



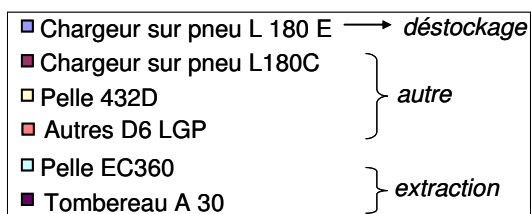
Emissions de NO_x



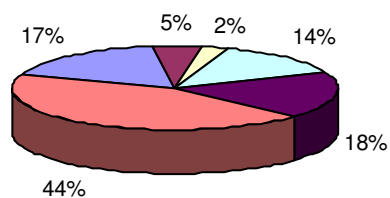
Emissions de SO₂



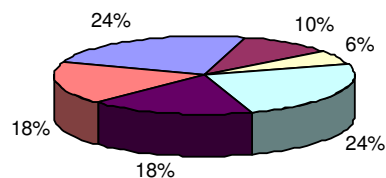
Emissions de CO



Émissions de composés organiques (COVNM et POP)

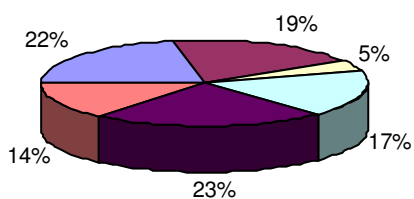


Emissions de COVNM

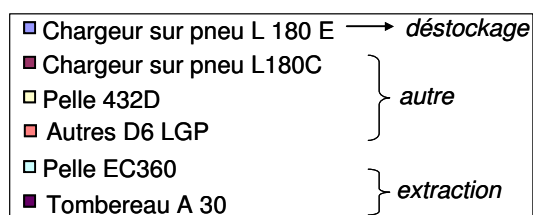


Emissions de POP

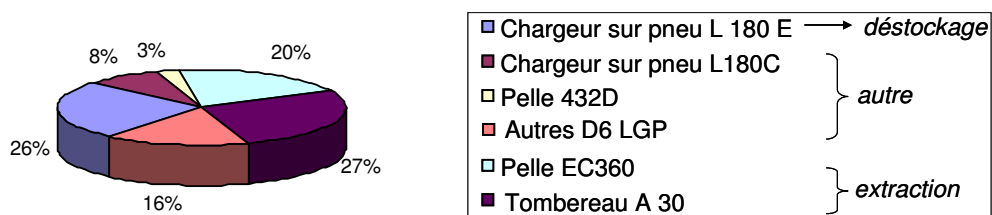
Émissions de particules solides (PM_{2,5} et PM₁₀)



Emissions de PM (2,5 et 10)

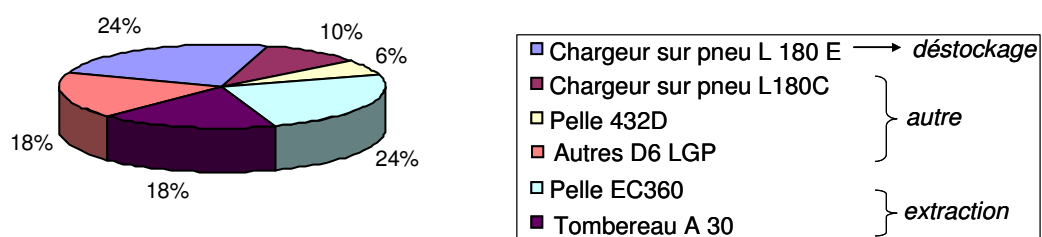


Émissions de métaux lourds (Cd, Cu, Cr, Ni, Se et Zn)



Emissions de métaux lourds

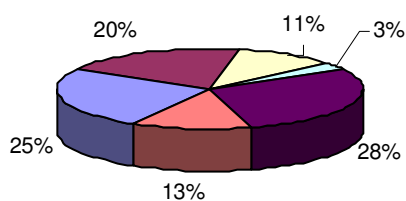
Émissions d'ammoniac (NH₃)



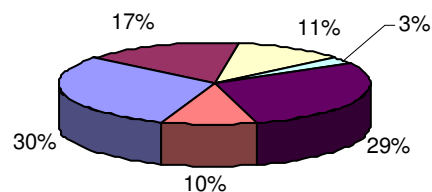
Emissions de NH₃

Site n° 3

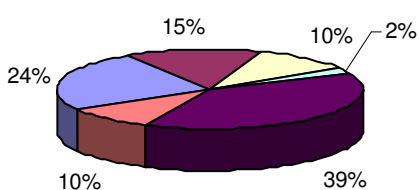
Émissions de gaz toxiques (NO_x, SO₂ et CO)



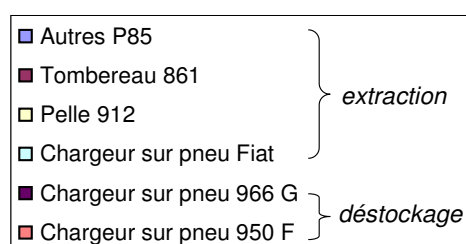
Emissions de NO_x



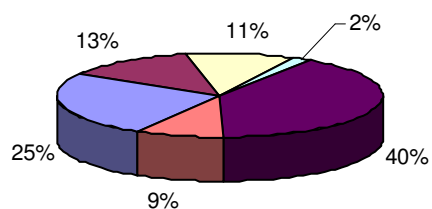
Emissions de SO₂



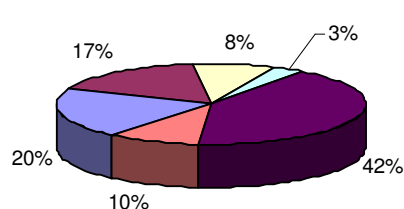
Emissions de CO



Émissions de familles chimiques organiques (COVNM et POP)

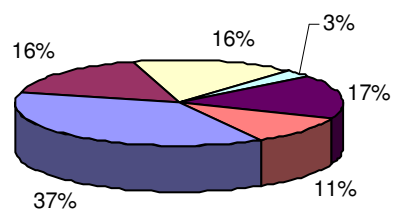


Emissions de COVNM

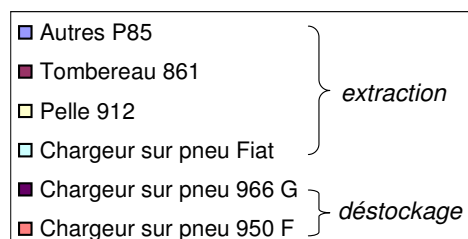


Emissions de POP

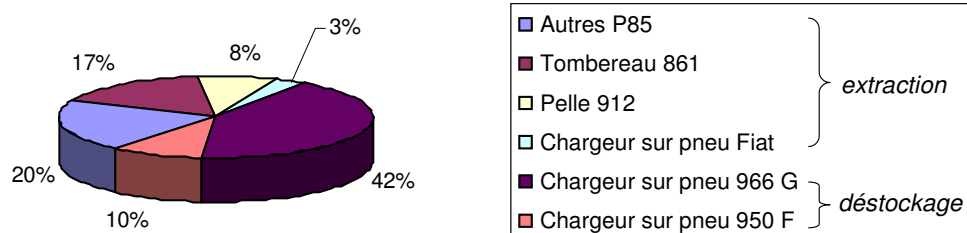
Émissions de particules solides (PM_{2,5} et PM₁₀)



Emissions de PM (2,5 et 10)

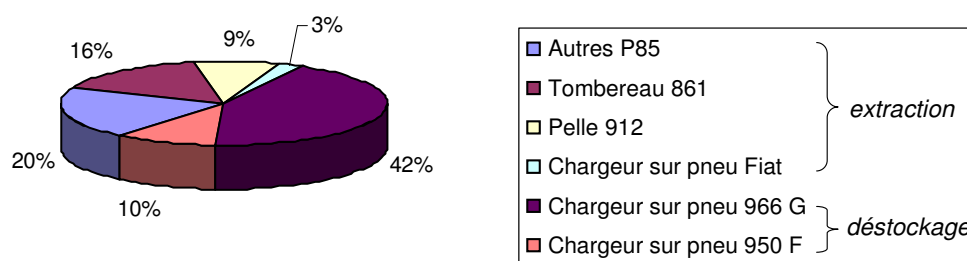


Émissions de métaux lourds (Cd, Cu, Cr, Ni, Se et Zn)



Emissions de métaux lourds

Émissions d'ammoniac (NH₃)



Emissions de NH₃

Glossaire

ACV :	Analyse du Cycle de Vie
ADEME :	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFNOR :	Association Française de Normalisation.
BTP :	Bâtiments et Travaux Publics
BRGM :	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CADUR :	CARrière DURable
CE :	Commission Européenne
CESP :	Consommation d'Energie Spécifique de Production
CETUR :	Centre d'Études des Transports Urbain
CERTU :	Centre d'études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme
CITEPA :	Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique
CORALIE :	Coordination de la RéALisation des Inventaires d'Émissions
CORINAIR :	CORE INventory of AIR emissions
COV :	Composé Organique Volatil
COVNM :	Composé Organique Volatil Non Méthanique
DIREN :	Direction Régional de l'Environnement
DRIRE :	Directions Régionales de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement
EDF :	Électricité De France
E-HDI :	Environmental Human Development Index
EMEP :	European, Monitoring and Evaluation Program
EPA :	Environmental Protection Agency
EPE :	Évaluation des Performances Environnementales
ESI :	Environmental Sustainability Index
GIDIC :	Gestion Informatique des Données d'Installations Classées
GWP :	Global Warming Potential
HAP :	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
ICPE :	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
ICV :	Inventaire du Cycle de Vie
IFEN :	Institut Français de l'ENvironnement
INSEE :	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
IPCC :	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO :	International Organization for Standardization
LCPC :	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LRPC :	Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées
MEDD :	Ministère de l'Écologie et du Développement Durable
MES :	Matière En Suspension
MPG :	Maîtrise de Production des Granulats
NF :	Norme Française
NGF :	Nivellement général de la France
OCDE :	Organisation de coopération et de développement économiques
OFRIR :	Observatoire Français du Recyclage dans les Infrastructures Routières
PCB :	PolyChloroBiphényles
PER :	Pressions-État-Réponse
PLU :	Plan Local d'Urbanisme
PM :	Particle Matter
PME :	Petites et Moyennes Entreprises
PMI :	Petites et Moyennes Industries

POP :	Polluants Organiques Persistants
POS :	Plan d'Occupation des Sols
RGIE :	Règlement Général des Industries Extractives
RPE :	Référentiel de Progrès Environnemental
SAGE :	Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE :	Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDC :	Schémas Départementaux de Carrières
SETAC :	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SIG :	Système d'Information Géographique
SME :	Système de Management Environnemental
TEP :	Tonne Équivalent Pétrole
UEPG :	Union Européenne des Producteurs de Granulats
UNICEM :	Union Nationale des Industries de Carrières Et Matériaux de Construction
UNPG :	Union Nationale des Producteurs de Granulats
ZICO :	Zone d'intérêt Communautaire pour les Oiseaux
ZNIEFF :	Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

Liste des figures

Fig. 1 : Évolution de la production de granulat en France	18
Fig. 2 : Répartition de la production nationale en 2004, en millions de tonnes d'après (UNPG, 2004).....	19
Fig. 3 : Structure verticale d'un gisement inexploité	20
Fig. 4 : Les cinq principaux critères d'un tir de mine d'après (Sifre et Dumouza, 2002).....	20
Fig. 5 : Les paramètres de tir (Boilat et Marchal, 1993)	21
Fig. 6 : Transport par convoyeurs à bandes (à gauche).....	22
Fig. 7 : Transport par engins roulants (à droite).....	22
Fig. 8 : Exemple de transport couplé : chargeur / convoyeurs à bandes déplaçables et fixes (Prax, 1990).....	23
Fig. 9 : Exemple de réaménagement combiné	35
Fig. 10 : Positionnement du champ de l'étude vis à vis de l'ACV et de l'EPE (Personne, 1998 modifiée)	36
Fig. 11 : Étapes de l'Évaluation des Performances Environnementales selon AFNOR, 2000 ^a	37
Fig. 12 : Phases de l'ACV d'après série de normes ISO 14040 et suivantes.....	39
Fig. 13 : Schéma élémentaire des flux entrants et sortants d'une unité de production d'après AFNOR 2000 ^b	40
Fig. 14 : Courbe de pondération A	43
Fig. 15 : Exemple de variation du niveau sonore d'un engin (pelle hydraulique de 96 kW) et du LAeq équivalent (Source : LCPC)	44
Fig. 16 : Le modèle PER développé par l'OCDE (OCDE, 1993).....	47
Fig. 17 : Le potentiel de réchauffement global (GWP) et les durées de vie dans l'atmosphère des principaux gaz à effet de serre (IPCC, 2001).....	49
Fig. 18 : Les qualités d'un indicateur (Institut, 2001).....	52
Fig. 19 : Représentation des investigations réalisées à différentes échelles géographiques	58
Fig. 20 : Répartition géographique des productions de granulats (Arquié et al., 1990 ^a)	59
Fig. 21 : Production annuelle de granulats par région administrative.....	61
Fig. 22 : Caractéristiques des sites étudiés en fonction de la nature des roches exploitées et des productions	64
Fig. 23 : Localisation géographique du site n° 1	65
Fig. 24 : Vue générale de la zone d'extraction.....	66
Fig. 25 : Représentation schématique de la zone d'extraction.....	67
Fig. 26 : La zone d'élaboration du site n°1	67
Fig. 27 : Synoptique de l'installation d'élaboration de la carrière de roches massives (site n°1).....	69
Fig. 28 : Positionnement des prélèvements et des systèmes de pesée.....	71
Fig. 29 : Chemin de circulation des granulats dans l'installation de traitement du site n°1	72
Fig. 30 : Bilan massique du site n°1	73
Fig. 31 : Vue aérienne de la zone d'élaboration des matériaux	77
Fig. 32 : Le système laveur-débourbeur	78
Fig. 33 : Synoptique de l'installation de traitement du site de roches alluvionnaires : site n°2	79
Fig. 34 : Les trémies de stockage et de déstockage à la sortie de l'installation de traitement .	80
Fig. 35 : La centrale de recomposition.....	81
Fig. 36 : Comparaison des CESP mensuelles en carburant sur le site n°2.....	85
Fig. 37 : Comparaison des CESP mensuelles en électricité sur le site n°2	86
Fig. 38 : L'extraction par la dragueline sur le site n°3	87
Fig. 39 : Synoptique de l'installation de traitement du site n°3	88
Fig. 40 : Roue à sable.....	88

Fig. 41 : Synoptique de la centrale de recombinaison du site n°3	89
Fig. 42 : La centrale de recombinaison du site n°3.....	89
Fig. 43 : Comparaison des CESP mensuelles en carburant sur le site n°3.....	94
Fig. 44 : Comparaison des CESP mensuelles en électricité sur le site n°3.....	94
Fig. 45 : Fluctuations des valeurs de CESP en électricité sur les sites n°2 et 3.....	95
Fig. 46 : Fluctuation des valeurs de CESP en fioul sur les sites n°2 et 3.....	96
Fig. 47 : Schématisation d'une exploitation de carrière au sens de l'Analyse Cycle de Vie.	102
Fig. 48 : Structure générale de l'outil CADUR.....	103
Fig. 49 : Modèles développés dans l'outil CADUR.....	105
Fig. 50 : Organisation générale des calculs de besoins électriques de CADUR.....	106
Fig. 51 : Principe d'évaluation des rejets atmosphériques générés par les engins de chantiers (hors CO ₂ et SO ₂)	111
Fig. 52 : Sources ponctuelles (a) et sources linéiques (b)	113
Fig. 53 : Relation vitesse du son dans l'air / l'humidité relative de l'air (Harris, 1971).....	114
Fig. 54 : Valeur d'atténuation en dB(A) par kilomètre, à la fréquence de 500 Hz	115
d'après AFNOR, 1993.....	115
Fig. 55 : l'effet du vent (d'après CETUR, 1980)	115
Fig. 56 : L'effet d'écran (d'après CETUR, 1980).....	117
Fig. 57 : Calcul de l'atténuation due à un écran par l'abaque de Maekawa.....	118
Fig. 58 : Définition de la différence de marche (δ)	118
Fig. 59 : Différence de marche pour un écran épais (> 1 m).....	118
Fig. 60 : Effet de la végétation	119
Fig. 61 : Principe du calcul de détermination du niveau sonore	123
Fig. 62 : Page d'accueil de l'outil CADUR	125
Fig. 63 : Paramètres d'entrée de l'outil CADUR	126
Fig. 64 : Structure de la base de données « sites » de CADUR	126
Fig. 65 : Options de calculs par modèles développés.	127
Fig. 66 : Affichage des consommations énergétiques.....	127
Fig. 67 : Tableau de résultats des rejets atmosphériques	128
Fig. 68 : Graphiques de répartition des rejets atmosphériques	128
Fig. 69 : Influence des mesures de protection sonore	129
Fig. 70 : Lignes de production sur le site n°1 et bilans massiques associés (mesures de site)	135
Fig. 71 : Répartition de l'énergie consommée sur le site n° 3 en 2004 et 2005.....	139
Fig. 72 : Répartition de l'énergie consommée sur le site n°1	142
Fig. 73 : Répartition de l'énergie consommée sur le site n°2 en 2004 et 2005.....	144
Fig. 74 : Répartition des émissions de gaz à effets de serre sur le site n°1.....	149
Fig. 75 : Répartition des émissions de gaz à effets de serre sur le site n°2.....	150
Fig. 76 : Répartition des émissions de gaz à effets de serre sur le site n°3.....	151
Fig. 77 : Emplacement des points d'estimation de niveau sonore sur le site n°1	153
(source photo : Google Earth, ©2007)	153
Fig. 78 : Emplacement des points d'estimation de niveau sonore sur le site n°2	154
(source photo : Google Earth, ©2007)	154
Fig. 79 : Rappel des différences entre les sites étudiés.	155
Fig. 80 : Synthèse des consommations électriques moyennes calculées entre les sites étudiés	156
Fig. 81 : Synthèse des consommations électriques calculées par année entre les sites étudiés	157
Fig. 82 : Synthèse des consommations de fioul moyennes calculées entre les sites étudiés .	157

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Les principaux concasseurs utilisés.....</i>	24
<i>Tableau 2 : Organisation du Schéma Départemental des Carrières.....</i>	30
<i>Tableau 3 : Exemples de réaménagement possible de carrières</i>	34
<i>Tableau 4 : Bilan des différentes méthodes normalisées selon l'objectif recherché et l'objet considéré</i>	51
<i>Tableau 5 : Résultats des indicateurs de développement durable ESI et E-HDI (Boutaud, 2005).....</i>	53
<i>Tableau 6 : Recensement des exploitations de carrière sur le territoire national.....</i>	60
<i>Tableau 7 : Les carrières en Loire-Atlantique en 2005 (source : DRIRE 44).....</i>	62
<i>Tableau 8 : Caractéristiques géotechniques des granulats produits.....</i>	66
<i>Tableau 9 : Bilan des masses de matériaux transportés jusqu'à l'installation d'élaboration</i>	70
<i>Tableau 10 : Calcul des débits journaliers</i>	72
<i>Tableau 11 : Caractéristiques des différents engins présents sur le site n°1</i>	73
<i>Tableau 12 : Caractéristiques des différents moteurs électriques du site n°1</i>	74
<i>Tableau 13 : Plans de tir réalisés sur le site n°1 et quantités des différents explosifs utilisés</i>	75
<i>Tableau 14 : Répartition granulométrique moyenne de matériaux extraits et produits.....</i>	75
<i>Tableau 15 : Caractéristiques intrinsèques de granulats produits (d'après fiche commerciale)</i>	76
<i>Tableau 16 : Productions mensuelles du site n°2</i>	81
<i>Tableau 17 : Caractéristiques des engins présents sur le site n°2</i>	82
<i>Tableau 18 : Récapitulatif des consommations et des dépenses de carburant sur le site n°2.</i>	82
<i>Tableau 19 : Caractéristiques des différents moteurs électriques du site n°2.....</i>	83
<i>Tableau 20 : Récapitulatif des consommations et des dépenses électriques sur le site n°2</i>	84
<i>Tableau 21 : Évolution de la production et des proportions respectives des consommations en électricité et en carburant sur le site n°2</i>	84
<i>Tableau 22 : CESP annuelle du site n°2</i>	85
<i>Tableau 23 : Caractéristiques intrinsèques de granulats produits (d'après fiche commerciale)</i>	86
<i>Tableau 24 : Productions mensuelles du site n°3</i>	90
<i>Tableau 25 : Caractéristiques des différents engins présents sur le site n°3</i>	90
<i>Tableau 26 : Récapitulatif des consommations et des dépenses de carburant sur le site n°3.</i>	91
<i>Tableau 27 : Caractéristiques des différents moteurs électriques du site n°3.....</i>	92
<i>Tableau 28 : Récapitulatif des consommations électriques mensuelles et leurs dépenses associées sur le site n°3.....</i>	93
<i>Tableau 29 : Évolution annuelle de la production et des proportions respectives des consommations en électricité et en carburant sur le site n°3</i>	93
<i>Tableau 30 : CESP annuelle du site n°3</i>	94
<i>Tableau 31 : Liste d'indicateurs potentiels relatifs à la ressource en granulats naturels et domaines d'études sélectionnés</i>	97
<i>Tableau 32 : Sources des données nécessaires à l'utilisation de l'outil CADUR</i>	104
<i>Tableau 33 : Exemple de composition des lignes de production</i>	107
<i>Tableau 34 : Quantités de matériaux traversant chaque équipement</i>	107
<i>Tableau 35 : Paramètres permettant la détermination des masses par ligne de production</i>	107
<i>Tableau 36 : Composition idéale théorique des gaz de détonation</i>	109
<i>Tableau 37 : Facteurs unitaires des émissions atmosphériques pris pour le modèle.....</i>	110
<i>Tableau 38 : Niveau de puissance acoustique admissible fixée par la directive 2005/88/CE</i>	120
<i>Tableau 39 : Différence de Lw entre les valeurs mesurées et les valeurs fixées par la directive 2005/88/CE (phase II).....</i>	121

Tableau 40 : Facteurs de correction utilisés dans la méthode du LRPC de Blois	121
Tableau 41 : Formules de détermination du LAeq selon le type de source.	122
Tableau 42 : Comparaison des LAeq selon les méthodes du LRPC et de CADUR	122
Tableau 43 : Lignes de production réelles par classes granulométriques sur le site n°1	134
Tableau 44 : Lignes de production potentielles par classes granulométriques sur le site n°2 (f :fuseau ; sc : semi-concassé)	136
Tableau 45 : Consommations électriques, obtenues par CADUR, sur le site n°2 selon les différentes configurations.....	137
Tableau 46 : Nombre de ligne de production par classes granulométriques sur le site n°3 .	137
Tableau 47 : Consommations électriques sur le site n°3, calculées par CADUR,	138
Tableau 48 : Valeurs des CESP calculées par CADUR,	139
Tableau 49 : Comparaison des valeurs de CESP estimées et réelles pour le site n°3 (configuration 3)	140
Tableau 50 : Comparaison des valeurs des CESP corrigées pour le site n°3	141
Tableau 51 : Résultats de simulation pour le site n°1 en lignes directes.....	141
Tableau 52 : Résultats de simulation pour le site n°1 en conditions de production usuelles	142
Tableau 53 : Valeurs des CESP calculées par CADUR par classes granulaires sur le site n°2 (configuration n°3).....	143
Tableau 54 : Comparaison des valeurs de CESP estimées et réelles pour le site n°2.....	143
Tableau 55 : Comparaison des valeurs des CESP corrigées pour le site n°2	144
Tableau 56 : Synthèse des valeurs de CESP calculées	145
Tableau 57 : Émissions de gaz à effet de serre et de gaz toxiques	146
Tableau 58 : Émissions de polluants organiques, de particules solides et d'ammoniac	146
Tableau 59 : Émissions de métaux lourds.....	146
Tableau 60 : Émissions atmosphériques générés lors des tirs d'abattage sur le site n°1	147
Tableau 61 : Émissions de gaz à effet de serre et de gaz toxiques	147
Tableau 62 : Émissions de composés organiques, de particules solides et d'ammoniac	147
Tableau 63 : Emissions de métaux lourds.....	147
Tableau 64 : Émissions de gaz à effet de serre et de gaz toxiques	148
Tableau 65 : Émissions de polluants organiques, de particules solides et d'ammoniac	148
Tableau 66 : Émissions de métaux lourds.....	148
Tableau 67 : Rappel des données d'entrée des engins du site n°1	149
Tableau 68 : Rappel des données d'entrée des engins du site n°2	150
Tableau 69 : Rappel des données d'entrée des engins du site n°3	151
Tableau 70 : Comparaison des valeurs de niveau sonore réelles et calculées par CADUR.	152
Tableau 71 : Prédictions des niveaux sonores sur le site n°1.....	153
Tableau 72 : Prédictions sonores sur le site n°2	154
Tableau 73 : Comparaison avec des données de la littérature de consommation énergétique	155
Tableau 74 : Prédictions de l'indicateur GWP 100 d'après l'outil pour les 3 sites (moyenne pour toutes les classes granulométriques)-engins	158

Thomas MARTAUD

**Evaluation environnementale de la production de granulats
en exploitation de carrières**

- Indicateurs, Modèles et Outils -

Les granulats naturels, seconde matière première consommée en France, sont élaborés à partir de roche, ressource non renouvelable. La prise de conscience de l'importance de la protection de l'environnement et des impacts associés à l'élaboration de produits manufacturés, favorise le développement de méthodes destinées à mieux approcher les impacts de leur production. Dans ce contexte, ce travail concerne l'évaluation environnementale d'exploitations industrielles en carrière. Il s'appuie sur une collecte de données de sites utiles à cette évaluation, suivie de la réalisation d'un modèle d'évaluation globale des consommations d'énergie, rejets atmosphériques et émissions sonores générées lors de l'élaboration de granulats. Ce modèle, basé sur des indicateurs, est conçu pour être paramétrable selon la nature pétrographique du site (roche meuble ou massive). La mise au point d'un outil d'évaluation, nommé CADUR (CARrière DURable) permet i) d'obtenir des données environnementales relative à la production de granulats naturels ; ii) de mettre en évidence que le paramètre prépondérant de l'évaluation en carrière est la configuration elle-même de l'exploitation considérée ; iii) de suivre, pour l'exploitant, l'évolution de ces performances, d'en comprendre les raisons et de quantifier l'effet d'éventuelles modifications. Vis-à-vis des données de sites collectées, les résultats fournis par CADUR offrent une relative bonne précision. Ils montrent des écarts, avec les données réelles, inférieurs à 10 % pour les consommations énergétiques et à 5 % concernant les niveaux sonores.

Mots clés : granulat, carrière, évaluation environnementale, indicateur, développement durable

**Environmental evaluation of the production of aggregates
in quarries**

- Indicators, Models and Tools -

Natural aggregates, second raw material consumed in France, are elaborated starting from rock, non-renewable resource. The awakening of the importance to protect the environment and of the impacts associated with the production of manufactured goods, supports the development of methods intended for better approaching the impacts of their production. In this context, this work deals with the environmental evaluation of industrial quarry exploitations. It is based on a data acquisition of sites useful to this evaluation, followed by the realization of a global assessment model of energy consumption, atmospheric emissions and sound levels generated during the elaboration of aggregates. This model, based on indicators, is designed to be skeletal depending on the petrographic nature of the site (loose or massive rock). The set up of an assessment tool, named CADUR (CARrière DURable, *sustainable quarry in French*) allows i) to obtain environmental data related to the production of natural aggregates; ii) to highlight that the dominant parameter of quarry evaluation is the configuration of the exploitation itself; iii) for the producer, to follow the evolution of these performances, to include/understand the reasons and to quantify the effect of potential modifications. According to the data of the sites collected, the results provided by CADUR offer quite a good precision. They show variations, with the real data, lower than 10% for energy consumptions and 5% concerning the noise levels.*

Key words: aggregate, quarry, environmental evaluation, indicator, sustainable development



L'esprit de recherche au cœur des réseaux

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Route de Bouaye

BP 4129

44341 Bouguenais cedex

Tél : 02 40 84 58 00 - Fax : 02 40 84 59 99



L'esprit de recherche au cœur des réseaux